

分类号: TB332

密 级: 公开

学校代码: 10363

学 号: 2220220104



安徽工程大学

Anhui Polytechnic University

硕士学位论文

题 目 《低共熔溶剂体系下马来酸酐接枝低密度聚乙烯
及在木塑复材中的应用》

论 文 作 者 孟瑞杰

校 内 导 师 左如忠 (教授)

校 外 导 师 陈福涛

专业学位类别 材料与化工

研究方向 (领域) 木塑复合材料绿色制备技术

论文提交日期: 2025 年 5 月 15 日

分类号: TB332

单位代码: 10363

密 级: 公开

学 号: 2220220104

低共熔溶剂体系下马来酸酐接枝低密度聚乙烯及在木
塑复材中的应用

Maleic Anhydride Grafted Low-Density Polyethylene
under the Deep Eutectic Solvent System and Its
Application in Wood-Plastic Composites

学生姓名: 孟瑞杰

指导教师: 左如忠 (教授)

校外导师: 陈福涛

专 业: 材料与化工

研究方向: 木塑复合材料绿色制备技术

论文答辩日期: 2025 年 5 月 10 日

安徽工程大学学位论文原创性声明

本人郑重声明：我恪守学术道德，崇尚严谨学风。所呈交的学位论文，是本人在导师的指导下，独立进行研究工作所取得的成果。除文中已明确注明和引用的内容外，本论文不包含任何其他个人或集体已经发表或撰写过的作品及成果的内容。论文为本人亲自撰写，我对所写的内容负责，并完全意识到本声明的法律后果由本人承担。

学位论文作者签名：

日期： 年 月 日

安徽工程大学学位论文版权使用说明书

学位论文作者完全了解学校有关保留、使用学位论文的规定，同意学校保留并向国家有关部门或机构送交论文的复印件和电子版，允许论文被查阅或借阅。本人授权安徽工程大学可以将本学位论文的全部或部分内容编入有关数据库进行检索，可以采用影印、缩印或扫描等复制手段保存和汇编本学位论文。

保密 ☐，在 _____ 年解密后适用本版权书。

本学位论文属于

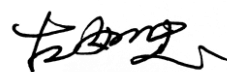
不保密 ☒。

学位论文作者签名：

日期： 年 月 日

指导教师签名：

日期： 年 月 日



低共熔溶剂体系下马来酸酐接枝低密度聚乙烯及其在木塑复材中的应用

摘 要

在材料科学不断发展的背景下，木塑复合材料（WPC）因兼具木材和塑料的优点，且符合环保与可持续发展理念，在建筑、家具、汽车内饰等多领域广泛应用。木纤维与塑料基体间的不相容性致使复合材料存在界面缺陷，严重影响其力学性能与加工性能。本研究聚焦于低共熔溶剂体系下马来酸酐接枝聚乙烯（MAH-PE）相容剂的制备及其在碳纤维增强木塑复合材料中的应用，旨在提升木塑复合材料的综合性能。具体研究内容和研究结果如下：

（1）采用物质的量比为 1:2 的氯化锌/乳酸（ ZnCl_2/LA ）低共熔溶剂对聚乙烯（PE）粒子进行预处理，制备了 MAH 接枝的 PE（MAH-DPE）相容剂。通过多种测试手段对制备过程和产物进行研究，结果显示： ZnCl_2/LA 体系形成稳定均质溶液，其红外光谱特征峰发生偏移和重叠。经处理后的 PE 粒子（DPE）表面粗糙，出现溶解痕迹，在特定波段吸收信号增强，表明含氧基团增加、极性增强；XRD 谱图显示其结晶度减小，无定形区增加；TG 和 DTG 曲线表明 PE 主体结构热分解过程未变。对比实验表明，经 ZnCl_2/LA 体系预处理的 PE 粒子，MAH 接枝率提升 10% 以上。

（2）将 MAH-DPE 相容剂应用于木塑复合材料（WF/LDPE）、短切碳纤维增强木塑复合材料（SCF/WF/LDPE）和长连续碳纤维增强

木塑复合材料 (LCF/WF/LDPE)。研究发现, 在 WF/LDPE 中, MAH-DPE 凭借更高的接枝率, 增强了木粉与塑料基体间的界面结合力, 形成化学键, 拉伸强度提升约 6MPa, 弯曲强度提升约 7MPa, 冲击强度提升幅度最高达 21%, 有效改善了木塑复合材料的力学性能。在 SCF/WF/LDPE 方面, SEM 观察表明其与聚乙烯基体界面结合良好。红外光谱和 XRD 分析显示, 原材料与碳纤维共混成功, 且加入碳纤维后材料结晶度增加, 分子链排列更规则。力学性能测试表明, 添加新型 MAH-DPE 后, 材料拉伸强度提升 26.08%, 抗弯强度提升 36%, 冲击强度提升 15%。动态热机械性能方面, 碳纤维增强了复合材料的储能模量, MAH-DPE 在低温下对刚度影响更大; 蠕变性能分析显示, 碳纤维能抑制塑料分子链运动, 减小蠕变; 在耐水性能上, MAH-DPE 降低了复合材料的吸水率和厚度膨胀率, 吸水 168h 后, 吸水率从 5.84% 降至 2.23%, 厚度膨胀率从 0.1% 降至 0.09%。

(3) 对于 LCF/WF/LDPE, 长碳纤维的加入显著提升了弯曲、拉伸和冲击强度。添加 MAH-DPE 后, 复合板弯曲强度提升 14%, 拉伸强度提升 18%, 模量变化不大; 冲击强度提升 35%。热机械性能、蠕变性能、吸水率和厚度膨胀率等方面的表现与 SCF/WF/LDPE 类似, 进一步证明新型 MAH-DPE 能优化复合材料性能。

关键词: 低共熔溶剂, 相容剂, 碳纤维增强, 力学性能, 木塑复合材料

MALEIC ANHYDRIDE GRAFTED LOW-DENSITY POLYETHYLENE UNDER THE DEEP EUTECTIC SOLVENT SYSTEM AND ITS APPLICATION IN WOOD- PLASTIC COMPOSITES

ABSTRACT

Against the backdrop of the continuous development of materials science, wood-plastic composites (WPC) have been widely used in various fields such as construction, furniture, and automotive interiors due to their combination of the advantages of wood and plastics and their compliance with the concepts of environmental protection and sustainable development. However, the incompatibility between wood fibers and the plastic matrix leads to interface defects in the composites, seriously affecting their mechanical and processing properties. This study focuses on the preparation of maleic anhydride grafted polyethylene (MAH-PE) compatibilizer in a deep eutectic solvent system and its application in carbon fiber-reinforced wood-plastic composites, aiming to enhance the comprehensive properties of wood-plastic composites. The specific research contents and results are as follows:

(1) Polyethylene (PE) particles were pretreated with a deep eutectic solvent of zinc chloride/lactic acid (ZnCl₂/LA) with a molar ratio of 1:2 to

prepare MAH-grafted PE (MAH-DPE) compatibilizer. The preparation process and products were studied by various testing methods. The results show that the ZnCl_2/LA system forms a stable and homogeneous solution, and the characteristic peaks of its infrared spectrum shift and overlap. The surface of the treated PE particles (DPE) is rough with dissolution traces, and the absorption signals in the $1003 - 1133 \text{ cm}^{-1}$ and $1610 - 1700 \text{ cm}^{-1}$ bands are enhanced, indicating an increase in oxygen-containing groups and an enhancement of polarity; the XRD pattern shows a decrease in crystallinity and an increase in the amorphous region; the TG and DTG curves indicate that the thermal decomposition process of the main structure of PE remains unchanged. Comparative experiments show that the grafting rate of MAH on PE particles pretreated by the ZnCl_2/LA system is increased by more than 10%.

(2) The MAH-DPE compatibilizer was applied to wood-plastic composites (WF/LDPE), chopped carbon fiber-reinforced wood-plastic composites (SCF/WF/LDPE), and long continuous carbon fiber-reinforced wood-plastic composites (LCF/WF/LDPE). It was found that in WF/LDPE, MAH-DPE, with a higher grafting rate, enhanced the interfacial bonding force between wood flour and the plastic matrix, forming chemical bonds. The tensile strength increased by about 6 MPa, the flexural strength increased by about 7 MPa, and the impact strength increased by up to 21%, effectively improving the mechanical properties of wood-plastic

composites. For SCF/WF/LDPE, SEM observation shows that it has a good interfacial combination with the polyethylene matrix. Infrared spectroscopy and XRD analysis show that the raw materials are successfully blended with carbon fibers, and the crystallinity of the material increases and the molecular chain arrangement becomes more regular after the addition of carbon fibers. Mechanical property tests show that after adding the new MAH-DPE, the tensile strength of the material increases by 26.08%, the flexural strength increases by 36%, and the impact strength increases by 15%. In terms of dynamic thermomechanical properties, carbon fibers enhance the storage modulus of the composite, and MAH-DPE has a greater impact on stiffness at low temperatures; creep property analysis shows that carbon fibers and MAH-DPE can inhibit the movement of plastic molecular chains and reduce creep; in terms of water resistance, MAH-DPE reduces the water absorption rate and thickness swelling rate of the composite. After 168 h of water absorption, the water absorption rate decreased from 5.84% to 2.23%, and the thickness swelling rate decreased from 0.1% to 0.09%.

(3) For LCF/WF/LDPE, the addition of long carbon fibers significantly improved the flexural, tensile, and impact strengths. After adding MAH-DPE, the flexural strength of the composite board increased by 14%, the tensile strength increased by 18%, and the modulus changed little; the impact strength increased by 35%. The performance in terms of

thermomechanical properties, creep properties, water absorption rate, and thickness swelling rate is similar to that of SCF/WF/LDPE, further demonstrating that the new MAH-DPE can optimize the properties of the composite.

The MAH-DPE compatibilizer based on the deep eutectic solvent system successfully prepared in this study significantly improves the comprehensive properties of wood-plastic composites, providing a new direction for the development of wood-plastic composites. It is expected to promote their wide application in more fields and contribute to the sustainable development of related industries.

MENG Ruijie (Materials and Chemical Industry)

Supervised by ZUO Ruzhong

KEY WORDS: Deep eutectic solvent, Compatibilizer, Carbon fiber reinforcement, Mechanical properties; Wood and plastic composite materials

目录

摘 要	I
ABSTRACT.....	III
目 录	VII
第 1 章 绪论.....	1
1.1 引言.....	1
1.2 木塑复合材料概述.....	2
1.2.1 木塑复合材料简介.....	2
1.2.2 木塑复合材料成型工艺.....	5
1.2.3 木塑复合材料缺点及增强方法.....	7
1.3 木塑复合材料相容剂研究进展.....	8
1.3.1 木塑复合材料相容剂的简介和分类.....	8
1.3.2 PE/PP-g-MAH 相容剂的研究现状及应用	8
1.4 纤维增强木塑复合材料概述.....	10
1.4.1 碳纤维分类、结构与性能.....	10
1.4.2 碳纤维增强复合材料制备工艺.....	10
1.4.3 碳纤维增强木塑复合材料国内外研究现状.....	11
1.5 本论文研究目的、研究内容及创新点.....	11
1.5.1 本论文研究目的.....	11
1.5.2 研究内容.....	12
1.5.3 本论文创新点.....	13
第 2 章 基于低共熔溶剂体系的马来酸酐接枝聚乙烯相容剂的制备及性能研究	14
2.1 引言.....	14
2.2 实验原料及设备.....	14
2.2.1 实验原料.....	14
2.2.2 实验设备.....	15
2.3 实验部分.....	15
2.3.1 样品制备.....	15

2.3.2 测试与表征.....	16
2.4 结果与讨论.....	17
2.4.1 ZnCl ₂ /LA 体系表征.....	17
2.4.2 低共熔溶剂处理后的 DPE 测试表征	18
2.4.3 MAH-DPE 接枝率测定	20
2.5 本章小结.....	21
第 3 章 MAH-DPE 在碳纤维增强木塑复合材料中的应用	23
3.1 引言.....	23
3.2 实验原料及设备.....	24
3.2.1 实验原料.....	24
3.2.2 实验主要设备.....	24
3.3 实验部分.....	25
3.3.1 木塑复合材料的制备.....	25
3.3.2 短切碳纤维增强木塑复合材料的制备.....	27
3.3.3 长连续碳纤维增强木塑复合材料的制备.....	28
3.3.4 测试与表征.....	31
3.4 结果与讨论.....	33
3.4.1 MAH-DPE 用于 WF/LDPE 的性能与分析	33
3.4.2 MAH-DPE 用于 SCF/WF/LDPE 的性能与分析	37
3.4.3 MAH-DPE 用于 LCF/WF/LDPE 的性能与分析.....	45
3.5 本章小结.....	50
第 4 章 结论与展望.....	52
4.1 结论.....	52
4.2 展望.....	52
参考文献.....	54
攻读学位期间主要成果.....	63
致 谢.....	64

第 1 章 绪论

1.1 引言

随着科学技术以日新月异之势飞速发展，人们对材料的性能和功能提出了更为严苛且多元的需求。单一功能的传统材料已然难以契合当今社会复杂多样的实际应用场景，在这样的时代背景与发展需求的双重驱动下，各种高性能复合材料如雨后春笋般相继涌现。从本质上来说，复合材料是将几种性质单一且彼此存在差异的材料^[1]，通过特定的混合工艺和加工手段，精心制备而成的新型材料。这种材料不仅完美继承了各单一组分的原有性能优势，更在巧妙重组之后，衍生出了一系列全新且卓越的性能特征，极大地拓展了其应用范围和潜力^[2]。

如今，随着复合材料制备技术的不断革新与完善，其加工成本呈现出持续下降的趋势，同时，机械化和自动化程度却在不断攀升。这些显著的优势使得复合材料在各个领域的应用愈发广泛和深入，成为了现代工业和社会发展不可或缺的关键材料。它助力航天器实现轻量化设计，提升性能；为医疗器械和生物材料的创新提供了可能；赋予建筑结构更高的强度和耐久性；推动了汽车、高铁等交通工具的高效、节能发展。

事实上，复合材料的应用历史源远流长，可追溯至两千年前，当时人们便已开始使用天然植物纤维与泥土的混合物作为一种原始的复合材料^[3]。到了 20 世纪 40 年代，成功制造出了玻璃纤维增强聚酯材料^[4]，这一创新性的成果开启了现代复合材料发展的新纪元。随后，在 1950 年前后，世界上第一批短纤维增强树脂复合材料问世，进一步丰富了复合材料的种类和应用领域^[5]。1965 年，长纤维增强树脂复合材料的成功开发，标志着复合材料技术又向前迈进了一大步^[6]。进入 1980 年，研发出连续型纤维增强复合材料，不断拓展着复合材料的性能边界^[7]。

我国在复合材料领域的研究起步较早，可追溯至 20 世纪 50 年代^[8]。经过多年的技术积累和研发投入，到 1969 年初，短纤维增强尼龙基复合材料已经达到了工业化生产的水平^[9]，展现出了我国在该领域的技术实力和创新能力。

热固性树脂作为一种在复合材料领域中广泛应用的基体树脂材料，凭借其轻

质高强、可设计性强等显著优点，在众多领域中占据了重要地位^[3]。然而，如同任何事物都具有两面性一样，热固性树脂也存在着一些不容忽视的缺点。例如，其加工周期较长，严重影响了生产效率；原料利用率较低，造成了资源的浪费；在加工过程中还会对环境造成一定程度的污染，这与当今社会对绿色环保和可持续发展的追求背道而驰。

随着全球各国对环境污染问题的关注度日益提升，以及对可持续发展理念的深入贯彻，开发新型环保型复合材料已成为当务之急^[10]。在这一背景下，热塑性树脂凭借其独特的性能优势脱颖而出，成为了理想的替代材料^[11]，热塑性树脂在加工过程中无需进行固化反应，不会产生任何对环境和人体有害的气体，从源头上杜绝了污染的产生。此外，其原料具有良好的可回收性，能够实现重复利用，这不仅大大降低了生产成本，还符合循环经济和可持续发展的理念^[12]。

1.2 木塑复合材料概述

1.2.1 木塑复合材料简介

世界上四大基础原材料包括塑料和木质材料，而在这些材料中，木质材料被认为是唯一可再生的资源^{[13][14]}。在使用过程中，这种木质材料会衍生出各种纤维废料，比如锯末、花生壳，还有就是农作物秸秆等等^[15]。在生活生产中，塑料显然具有重要作用，其中五种通用塑料——聚乙烯(PE)、聚氯乙烯(PVC)、聚丙烯(PP)、聚苯乙烯(PS)及 ABS，都与日常生活密切相关，但因其不可降解特性以及低回收率所导致的白色污染，对生态环境产生了巨大的威胁^[16]。在处理那些废旧木质纤维和废旧塑料时，人们普遍采用填埋、焚烧，但这样不仅污染土地，还对水源存在一定程度上的影响^{[17][18]}。近年来木塑复合材料作为一种新兴绿色环保材料赢得了关注，并逐渐受到青睐，它主要通过利用旧塑料和木质材料，通过模压、挤出和注塑成型^{[19][21]}。这类材料兼具塑料韧性与木材硬度，不仅能有效改善因废旧材料引起的环境问题，同时由于其实用性、成本抵达低廉等，以及抗菌能力，使其广泛应用在建筑园林中，同时在汽车内饰上有益。

1.2.1.1 PVC 木塑复合材料

聚氯乙烯(PVC)凭借其出色的电绝缘特性、化学稳定性和机械强度，在建筑材料、日常用品、工业产品、管道系统和通信电缆等多个领域获得广泛应用，该材料在耐热性和力学性能方面的不足，限制了其在某些特殊领域的应用潜力

[22], 研究人员通过引入木质纤维对 PVC 进行改性, 成功开发出多种木塑复合材料, 显著提升了材料的耐热性、力学性能和吸水特性。

不同植物纤维对 PVC 复合材料的性能影响显著, 唐婷等^[23]对比研究发现, 稻壳粉/PVC 复合材料较花生壳粉/PVC 表现出更优异的吸水性能, 这主要归因于植物纤维的多孔结构特性。段国燕等^[24]通过系统研究指出, 在竹粉、稻壳和桉木等不同植物纤维中, 桉木/PVC 复合材料展现出最优异的综合性能, 其拉伸强度、硬度和耐磨性均优于其他体系。为进一步优化材料性能, 冯泽旭等^[25]采用 DOP 和聚己二酸丙二醇酯对竹粉/PVC 复合材料进行改性, 发现增塑剂能有效降低材料的玻璃化转变温度和熔体粘度, 同时改善其低温性能和加工特性, 其中 DOP 表现出更高的增塑效率。胡圣飞等^[22]创新性地采用固相研磨法对稻壳进行预处理, 成功制备出具有优异力学性能和耐热性的稻壳粉/PVC 复合材料。

1.2.1.2 PS 木塑复合材料

聚苯乙烯 (PS) 是一种广泛应用的高分子材料, 因其具备优良的隔热性、电绝缘性以及光学性能, 在工业和日常生活中有着重要的应用。PS 的玻璃转化温度高于 100°C , 这使得它在高温环境下仍能保持稳定的物理性能, 因此常被用于制备各类需耐高温的一次性容器与泡沫饭盒, 如咖啡杯、快餐盒等。然而, PS 的耐候性欠佳, 长时间暴露在紫外线、氧气和湿气等环境因素下, 容易发生老化, 导致材料性能下降, 如变脆、变色等。为了克服这些缺点, 研究人员开发了 PS 木塑复合材料, 这种材料不仅能实现废旧 PS 的合理回收与高效利用, 减少环境污染, 还能通过添加木质纤维材料改善其性能, 如提高机械强度和耐候性。

在木塑复合材料吸水性能研究方面, 余旺旺^[26]的系统研究表明, 聚苯乙烯 (PS) 基复合材料展现出优异的吸水特性。这一研究成果揭示了 PS 基材料在潮湿环境应用中的独特优势, 特别是在户外家具、建筑模板等需要适度吸水性的领域具有广阔的应用前景。在阻燃改性研究领域, 王迪等^[19]创新性地采用模内发泡成型技术, 成功制备了刨花木/可发性聚苯乙烯 (EPS) 复合材料, 并利用三聚氰胺磷酸盐 (MPP) 实现阻燃功能化, 实验数据显示, 引入等量刨花木后, EPS 的极限氧指数 (LOI) 显著提升了 26.3%, 证实了材料阻燃性能的实质性改善, 当 MPP 添加量达到 22.5 份时, 材料的力学性能获得显著提升, 其中冲击强度增加了 191.7%, 静曲强度提高了 77.6%, 实现了材料综合性能的全面优化。

1.2.1.3 PP 基木塑复合材料

聚丙烯(PP)作为一种性能优良的热塑性合成树脂,因其良好的耐热性、电绝缘性、耐化学腐蚀性以及高耐磨加工性能,在汽车零部件、食品包装、家电外壳等领域得到广泛应用^[27]。这种材料结合了木质纤维的环保特性与PP的优异性能,不仅能够降低对传统塑料的依赖,还能有效利用农林废弃物(如木粉、秸秆等),在汽车内饰、建筑模板等高端领域的应用日益广泛。

张作才等^[28]通过,多种改性方法可显著提升PP基木塑复合材料性能:添加2%聚十二羟基硬脂酸超分散剂可优化熔体流动性和冲击强度。王苏炜等^[29]改造单螺杆挤出机发明PP/木粉发泡工艺,单螺杆挤出工艺结合POE/HDPE改性可分别提升冲击强度84%和材料刚性。关雅慧等^[30]用次磷酸铝阻燃改性PP木塑复合材料,次磷酸铝阻燃剂添加量达30%时,LOI提升至25.0%,热释放降低50%。徐博仁等^[31]用原位沉淀法在木粉表面构筑双氢氧化物(LDH)阻燃层制备PP木塑复合材料,原位沉淀法制备的LDH阻燃层在44.4%添加量时使LOI达20.1%。郭丹等^[32]对PP/秸秆粉(CSF)木塑复合材料辐射改性,并对结构和性能进行研究,发现电子束辐射改性有效改善界面相容性,显著提高力学性能和热稳定性。

1.2.1.4 PE 基木塑复合材料

PE作为一种性能卓越的高分子材料,具有良好的化学稳定性、加工性能、力学性能和抗老化性能^[33]。其化学稳定性使其能够在多种化学环境中保持稳定,不易与其他物质发生化学反应,这一特性使得PE在化工、食品包装等对材料稳定性要求较高的领域得以广泛应用。在加工性能方面,PE可以通过多种加工方式,极大地满足了不同行业的多样化需求。在力学性能上,PE具备较高的强度和韧性,能够承受一定程度的外力作用而不发生破裂或变形,这为其在建筑、机械制造等领域的应用提供了坚实的基础。同时,其良好的抗老化性能,使其在长期使用过程中,性能衰退缓慢,延长了产品的使用寿命。基于以上种种优势,PE在生产生活的各个领域都展现出了强大的适用性,从日常生活中的塑料袋、保鲜膜,到工业生产中的管道、容器等,都能看到PE的身影。

郭红军等^[34]研究了PE/竹木塑复合材料的制备及性能,发现NaOH预处理的竹纤维显著提升了材料的力学性能(冲击强度18.0kJ/m²,拉伸强度57MPa)并改善了吸水性,增强了其在潮湿环境中的适用性。祁睿格等^[35]通过添加无机纳米

粒子（如 NPCC）改性 HDPE/木粉木塑复合材料，NPCC 使线性热膨胀系数降低 38.95%，同时冲击、拉伸和弯曲强度分别提高 35.32%、32.86%和 11.05%，显著提升了材料的热稳定性和力学性能，拓展了其应用潜力。

1.2.1.5 ABS 基本塑复合材料

ABS 塑料融合了三种成分的特性，具备出色的耐化学腐蚀性与耐热性，同时拥有高弹性、高韧性，还兼具良好的加工性能和电绝缘性能，这些优势使其在汽车、家具、建筑以及 3D 打印等众多领域得到广泛应用^[36]。

李伟浩等^[37]通过向 ABS 中添加木粉和纳米蒙脱土（NMMT）来制备木塑复合材料，并使用马来酸酐接枝 ABS（ABS-g-MAH）作为界面相容剂，发现当木粉含量为 50%、NMMT 含量为 10%且 ABS-g-MAH 含量为 2%时，材料的界面相容与力学性能达到最好。杨飞文等^[38]研究表明，松木粉/ABS 复合材料在木粉质量分数为 15%时力学性能最优，添加 5%的多壁碳纳米管（MWNT）可进一步显著提升其力学性能。

1.2.2 木塑复合材料的成型生产工艺

根据木纤维的成分、木塑复合材料的配比、产品需求以及设备条件的不同，木材与塑料混合制成木塑复合材料的生产工艺主要包括以下几种^[39]：挤出成型、热压成型、模压成型、挤压成型和注塑成型。

1.2.2.1 挤出成型法

在工业生产中，双螺杆挤出机是挤出成型工艺的主要设备^[40]。得益于双螺杆挤出机产生，复合材料能够实现较高的模量和较低的吸水率^[41]。挤出过程中的关键参数包括进料速度、螺杆转速、物料筒温度等。这些参数对木塑复合材料力学性能的影响可能因敏感度较低而被忽视^[42]，在双螺杆挤出机的设计上，为了避免木粉在挤出过程中发生炭化，通常需要延长加料段的长度，同时缩短均化段的长度，以减少木粉在螺杆内的停留时间，还需确保进料合理分配使螺杆具备良好的排气功能，从而优化挤出效果。

1.2.2.2 热压成型法

热压成型技术常用于制备特定规格的木塑复合板材，然而，该技术存在明显不足，无法实现连续化生产，在一定程度上限制了其大规模应用^[42]。有研究者运用热压成型技术制备了聚乙烯基木塑复合板材，并针对其性能展开深入研究^[43]。

研究发现,木粉含量对板材的杨氏模量与拉伸应力影响显著。随着木粉含量逐步增加,杨氏模量呈逐渐上升态势。而弹性模量方面,却呈现出相反趋势,即木粉含量越高,弹性模量下降越明显。在木粉与复合材料性能的关系上,木粉的加入大幅提升了木塑复合材料的硬度,不过材料的断裂机制也由韧性断裂转变为脆性断裂。此外,相容剂对材料性能的影响具有多面性,其作用效果不仅取决于自身的特性,还与木粉之间的相互作用密切相关。适当添加相容剂能够显著改善木粉与树脂之间的界面结合力,但其用量必须精确控制在合理范围内。这样不仅能够有效提升木塑复合板材的弹性模量和拉伸强度,亦能同步提高其断裂伸长率,从而实现材料性能的全面优化^[43]。

1.2.2.3 模压成型法

模压工艺以植物纤维或碎料为增强体,添加树脂基体和相容剂等助剂,通过冷压或热压工艺制成复合材料^[44],模压制品的制作,可先采用直接铺装法制成板材坯料,再经热压成型冷压定型,在一定压力作用下,熔融的热塑性树脂流动性良好,能促使物料充分填充模具空间。模压工艺分为立体模压和平板模压两种^[45],立体模压法是将混合好的原料直接加入或者灌入一个封闭的立体模腔中热压成型,需留透气孔排气;平板模压法,实际上就是在上压板或者下压板中刻立体的槽痕,经铺装机铺层,然后热压成型,气体从板边逸出,但需解决沟槽内气体残留问题^[46]。

1.2.2.4 挤压成型法

挤压成型工艺能够显著提升木塑复合材料的性能和生产效率。与传统的热压成型相比,这种方法生产的板材长度大幅增加,适用于需要连续生产或大尺寸板材的应用场景。由于热压过程的同步作用,木塑复合材料制品的密度、力学性能和表面质量均得到显著提升,综合性能优于单纯挤出成型的板材。如挤压成型板材的拉伸强度、弯曲强度和耐磨性通常更高,同时其内部结构更加均匀,减少了气泡和缺陷的产生。这种工艺在建筑模板、户外地板等对材料性能要求较高的领域具有广阔的应用前景^[47]。

1.2.2.5 注塑成型法

注射成型的木塑复合材料具有高温流动性好、加工性能优异、木质质感、低成本、高光泽度等优点。其工艺以两步法为主,即先造粒后成型:首先将木粉进

行干燥，若需要可进行表面改性处理，然后用高速混合机与树脂共混造粒，再通过注塑机成型^[48]。

1.2.3 木塑复合材料缺点及增强方法

虽木塑复合材料在欧美已产业化，但其性能仍限于非结构应用。由于木质纤维亲水性与塑料疏水性导致的界面结合力弱，材料力学性能低于纯塑料。本课题通过低共熔溶剂处理增强界面相容性，以提升纤维增强木塑复合材料的综合性能。材料性能优化主要从增强纤维、优化基体和改善界面三方面着手^[49]：

1.2.3.1 对树脂基体进行改性处理

木塑复合材料的性能主要取决于树脂基体的韧性，它决定了材料的耐化学腐蚀性、耐老化性、抗蠕变性和耐水性^[50]树脂基体通过剪切作用传递载荷并重新分布应力，保护木纤维免受早期破坏和磨损^[51]。

为了完全发挥树脂基体的特性，必须提高基体与木纤维的结合效果，为提高树脂基体对木纤维的浸润性，使木纤维更好的浸渍于基体中，需优化界面结合，使两相协同分配载荷^[52]。

目前主要通过化学改性和辐射改性等方法改变树脂基体的化学结构、微晶形态和表面能，提升润湿性，从而改善复合材料的力学性能^[53]。

1.2.3.2 使用相容剂改变界面相容性

木纤维表面因含有大量羟基而表现出较强的极性和亲水性，而热塑性塑料通常具有非极性和疏水性特征^[54]。这种性质差异导致木纤维与塑料基体之间的界面黏合性和润湿性较差，从而影响复合材料的整体性能，则改善塑料与木纤维之间的界面相容性一直是木塑复合材料领域的重要研究方向^[55]。目前，最成熟且广泛应用的方法是添加相容剂，其中马来酸酐接枝聚乙烯类（如 MAPE）和有机硅烷类相容剂是最常用的类型。这些相容剂通过化学键或物理作用在木纤维与塑料之间形成桥梁，显著提升界面结合力，从而改善复合材料的力学性能、耐水性和耐久性。此外，近年来研究者也在探索其他改性方法，如等离子体处理、纳米粒子填充以及生物基相容剂的使用，以进一步优化界面性能并推动木塑复合材料在更广泛领域的应用。

1.2.3.3 使用增强纤维增强木塑复合材料

增强材料是指添加到复合材料中，能够与树脂基体形成粘结作用，从而提升

材料力学性能或其他性能的组分^[55]，其增强效果主要依赖于增强材料与木塑复合材料之间的相容性，因此部分增强材料在使用前需经过表面预处理以优化结合能力。在木塑复合材料的研究中，纤维是常用的增强材料，因其能够作为主要承力组分，显著提高材料的抗拉强度和刚性^[56]。

天然有机纤维具有来源广泛、成本低廉以及易于化学处理等优点，但其成分复杂，加工过程中易发生降解，且强度与木质纤维相近，导致增强效果有限，相比之下，人工合成纤维在综合性能上具有显著优势，正逐渐成为研究的热点^[57]。

1.3 木塑复合材料相容剂研究进展

1.3.1 木塑复合材料相容剂的简介和分类

相容剂的作用是通过分子间的键合力将两种不相容的物质形成稳定的共聚物。常见相容剂包括 PE-g-ST（聚乙烯接枝苯乙烯）、PE-g-MAH（聚乙烯接枝马来酸酐）、PP-g-ST（聚丙烯接枝苯乙烯）、PP-g-MAH（聚丙烯接枝马来酸酐）以及 ABS-g-MAH（丙烯腈-丁二烯-苯乙烯接枝马来酸酐）等。这些相容剂在塑料改性中的应用能够显著提升复合材料的力学性能、热稳定性及加工性能。

马来酸酐接枝相容剂通过强极性基团与木粉表面羟基发生酯化反应，提高木粉分散性，增强界面结合，改善木塑复合材料的相容性^{[58]-[63]}，并优化其拉伸强度、冲击强度和耐水性，马来酸酐接枝相容剂还能有效减少复合材料在加工过程中的热降解，提升其热稳定性，随着研究的深入，新型生物基相容剂和纳米改性相容剂也逐渐成为研究热点，为木塑复合材料的性能优化提供了更多可能性。

1.3.2 PE/PP-g-MAH 相容剂的研究现状及应用

现国内外已实现 PE、PP 等材料接枝马来酸酐（MAH）的工业化生产，并在粘合、改性和合金等多个领域得到广泛应用^{[64]-[66]}，

徐焕翔等^[67]通过固相接枝法制备了以聚丙烯（PP）为基体，与甲基丙烯酸甲酯（MMA）、马来酸酐（MAH）及丙烯酸丁酯（BA）等多单体接枝的共聚物（GPP），将该接枝共聚物添加到废聚丙烯（RPP）/稻糠（RC）共混体系中，研究了其对复合材料力学性能、微观形态及热性能的影响，实验结果表明，添加接枝共聚物后，复合材料的拉伸强度、弯曲强度、弯曲模量及维卡软化点均显著提升。

刘柳等^[68]采用熔融接枝法，以过氧化二异丙苯（DCP）为引发剂，在转矩流变仪中分别制备了丙烯酸（AA）接枝聚苯乙烯（PS-g-AA）、马来酸酐（MAH）

与丙烯酸（AA）双单体接枝 PS[PS-g-（MAH-co-AA）]以及马来酸酐（MAH）与醋酸乙烯酯（VAc）双单体接枝 PS[PS-g-（MAH-co-VAc）]三种相容剂，加入这些相容剂后，木塑复合材料的力学性能和加工性能均得到改善，扫描电镜分析进一步证实，树脂基体与木粉之间的界面黏结强度显著增强。

林松柏等^[69]通过马来酸酐单体接枝聚乙烯，分析了接枝率的影响因素，并利用红外光谱对接枝产物的微观结构进行了表征，探讨了接枝物和聚氯乙烯（PVC）含量对共混体系拉伸强度的影响，同时通过扫描电子显微镜观察了共混物的界面形貌，随着接枝物的加入，共混体系的相容性和力学性能均显著提高，其中当接枝率为 10%左右且 PVC 含量为 40%时，共混物的拉伸强度达到 13.8MPa，表现出优异的力学性能。

近年来，国内外众多学者通过多种接枝方法，如固相接枝、熔融接枝、溶液接枝、辐射接枝以及悬浮接枝等，成功合成了接枝共聚物，并将其用于改善两相不相容混合体系的相容性，取得了显著的研究成果^{[70]-[97]}

表 1-1 接枝工艺的优缺点

接枝工艺	优缺点
熔融接枝	无需回收，生产成本低，但易挥发，杂质难去除
溶液接枝	接枝均匀，接枝率高，无关反应少，但毒性大，不容易回收
固相接枝	无需加入溶剂，操作较简单，但反应器皿容易传热不均
悬浮接枝	易传热，温度低，无溶剂回收，但反应物易粘结
辐射接枝	常温可进行，处理不复杂，但需密闭空间，实验环境有伤害

由上表 1-1 可知，溶液接枝法接枝率高但溶剂毒性大、成本高；熔融接枝无需溶剂但设备要求高、接枝率低；辐射接枝后处理简单但需密闭环境；固相接枝温度可控但传热不均；悬浮接枝传热均匀、环境友好，最具工业化潜力。多单体接枝聚烯烃以熔融和固相接枝为主流方法。

1.3.3 PE-g-MAH 接枝机理

接枝反应中，引发剂分解产生自由基 R，打开 PE 链 π 键形成 PE 自由基，部分自由基激活马来酸酐生成马来酸酐自由基，两者结合形成马来酸酐接枝聚乙烯；部分马来酸酐以丁二酸酐环形式接枝到 PE 上，自由基通过耦合或与 PE 自由基结合终止反应。如图 1-1。

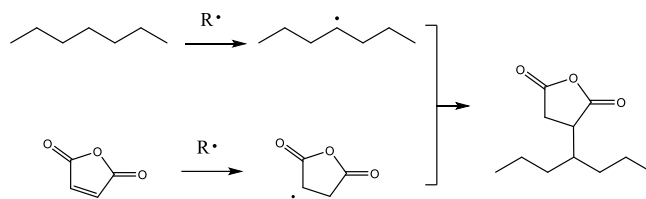


图 1-1 聚乙烯接枝马来酸酐反应机理

1.4 纤维增强木塑复合材料概述

1.4.1 碳纤维分类、结构与性能

碳纤维是通过有机纤维在惰性气体中经 1500℃高温碳化制得的微晶石墨材料，含碳量达 90%~99%，具有轻质高强、高模量、耐腐蚀、环境适应性强等优异性能，同时碳纤维增强塑料还具备良好的导电性和导热性^[98]，按原丝种类可分为聚丙烯腈基、黏胶基和沥青基碳纤维；按功能可分为纳米碳纤维、通用型、气相生长和高性能碳纤维等^[99]。

碳纤维其生产过程包括预氧化、炭化和经表面处理上浆后即得到碳纤维产品^[100]。碳纤维是种含碳量很高的脆性无机纤维，其基本结构为石墨微纤，结构由石墨微纤堆砌而成，微纤沿轴向排列形成原纤，进而构成单丝碳纤维^[101]。碳纤维模量取决于石墨微纤的轴向排列程度，排列越有序模量越高；通用级碳纤维因结构不发达且排列杂乱，性能较差^[102]。

碳纤维具有乱层石墨结构，碳原子层平行排列但缺乏三维有序性，每一层内的碳原子通过共价键连接，而层与层之间则依靠范德华力结合，因此碳纤维表现出各向异性特性^[103]，此外，碳纤维的结构呈现显著的非均匀性，包括致密的皮层和疏松的芯层，皮层结构紧密，石墨微晶尺寸大且排列有序，因此具有较高的模量（拉伸、弯曲）；而芯层结构松散，石墨微晶尺寸小且杂质多，模量仅为皮层的一半，这限制了碳纤维力学性能的发挥，且呈现非均匀的皮芯结构，皮层致密、模量高，芯层疏松、模量低，限制了力学性能^[1]。高温炭化使碳纤维表面活性降低，浸润性差，需通过表面改性引入含氧或含氮官能团以提高与树脂基体的结合力，从而提升复合材料性能^[104]。

1.4.2 碳纤维增强复合材料制备工艺

纤维增强树脂复合材料的制备中原料质量、工艺参数控制对材料性能有影响。碳纤维复合材料的成型方法多样，主要包括以下几种主要包括以下几种：

缠绕成型^[105]是目前应用较为广泛的工艺，适用于制造臂材、压力容器及各

类壳体材料，该工艺通过数控缠绕机将连续纤维丝缠绕在芯模上，分为湿法缠绕和干法缠绕，干法缠绕是将纤维或纤维布预先浸渍树脂并烘干后再进行缠绕，而湿法缠绕则是直接在缠绕过程中浸渍树脂。

手糊成型^[106]是一种发展较早的工艺，首先在模具上铺设脱模纸并涂覆胶衣，随后按设计要求裁剪复合材料并涂覆树脂，通过手工压制去除气泡，确保各层之间紧密贴合且无气泡，最后在室温或加热条件下固化成型，脱模后即可得到成品。

拉挤成型^[107]是将连续纤维或其织物浸渍树脂后，在牵引机的作用下通过成型模挤压并加热固化，纤维在浸渍前需干燥去除水分，成型过程中需调整模具温度、停留时间及牵引速度，最终可根据需求切割成特定尺寸。

模压成型^[108]是将短纤维浸渍树脂后与其他辅料混合，放入金属模具中，在特定温度和压力下压制成型，层压成型与之类似，但原料为浸渍树脂后的片材，可多层叠放后加压加热成型，夹层结构成型则通过热压机将木塑层与纤维层结合，木塑层强度高、密度大，而纤维层则较轻。

1.4.3 碳纤维增强木塑复合材料国内外研究现状

碳纤维具有卓越的抗拉强度、高弹性模量、优异的比性能、抗蠕变、耐疲劳、耐腐蚀以及良好的电磁屏蔽性能等特点^[109]，碳纤维作为增强材料被广泛应用于树脂、金属、陶瓷和混凝土等基体中，形成的复合材料在航空航天、国防军工及民用工业等领域发挥着重要作用，由于碳纤维兼具军民两用性质，我国在该领域的研究起步较晚且受到一定限制，且碳纤维成本高昂，目前其在增强木塑复合材料中的应用仍主要局限于研究阶段。

Zhou 等^[110]通过挤出成型工艺研究了短切碳纤维对木塑复合材料力学性能的影响，添加碳纤维后，复合材料的拉伸强度、弯曲强度和抗冲击性能分别提升了 97%-133%、113%-119%和 181%-251%，显著优于未增强的材料，与其他短切纤维相比，碳纤维在增强和增韧效果上表现更为突出。研究还发现，采用热压工艺将碳纤维布作为增强相，能够进一步显著改善木塑复合材料的力学性能^[111]。而碳纳米管作为一种超微结构的碳纤维，也被证明能够有效提升木塑复合材料的力学强度^{[112][113]}。为碳纤维增强技术的多样化应用提供了新的研究方向。

1.5 本论文研究目的、研究内容及创新点

1.5.1 本论文研究目的

当前碳纤维增强复合材料的研究重点包括：低共熔溶剂体系马来酸酐接枝聚乙烯相容剂的制备与性能研究，以及该相容剂对碳纤维增强木塑复合材料的影响。本论文通过短碳纤维和长连续碳纤维增强木塑复合材料，提升其力学性能。

（1）制备并研究低共熔溶剂体系的马来酸酐接枝聚乙烯相容剂：旨在通过低共熔溶剂处理，制备出低 MAH 含量、高接枝率和高粘接强度的马来酸酐接枝聚乙烯（MAH-PE）相容剂，并深入探究其性能，为解决木塑复合材料中木纤维与塑料基体极性差异大、界面相容性差的问题提供新的途径。

（2）探究相容剂对碳纤维增强及木塑复合材料的影响：研究低共熔溶剂体系的相容剂对木塑复合材料以及短切碳纤维、长连续碳纤维增强木塑复合材料性能的影响，包括力学性能、动态热机械性能、蠕变性能、耐水性能等，明确其作用机制，为材料的配方设计和性能优化提供理论依据。

（3）提高木塑复合材料的力学性能：分别使用短碳纤维、长连续碳纤维增强木塑复合材料，借助新型相容剂改善界面相容性，有效提高木塑复合材料的拉伸强度、弯曲强度、冲击强度等力学性能，拓展木塑复合材料的应用领域。

1.5.2 研究内容

为实现上述研究目标，本论文将开展以下三个方面的研究工作，具体研究内容为：

（1）马来酸酐接枝聚乙烯相容剂的制备及性能研究：制备氯化锌/乳酸（ ZnCl_2/LA ）低共熔溶剂并对 PE 粒子进行预处理，再进行马来酸酐接枝反应制备 MAH-DPE。通过微观形貌观察、红外光谱分析、X 射线相分析、接枝率测定等手段，研究 ZnCl_2/LA 体系特征、PE 粒子处理后的结构与性能变化以及 MAH-DPE 的接枝率，探究低共熔溶剂对 PE 的作用及对 MAH 接枝率的影响。

（2）低共熔溶剂体系的相容剂对木塑复合材料性能的影响：制备木塑复合材料（WF/LDPE）、短切碳纤维增强木塑复合材料（SCF/WF/LDPE）和长连续碳纤维增强木塑复合材料（LCF/WF/LDPE）。对这些复合材料进行拉伸、弯曲、冲击等力学性能测试，利用扫描电镜观察断面形貌，通过红外光谱和 X 射线衍射分析化学组成与晶体结构变化，测试动态热机械性能、蠕变性能、浸渍剥离性能以及吸水率和厚度膨胀率，研究新型相容剂对不同复合材料各项性能的影响规律。

(3) 提高木塑复合材料的力学性能：制备木塑复合材料（WF/LDPE）、短切碳纤维增强木塑复合材料（SCF/WF/LDPE）和长连续碳纤维增强木塑复合材料（LCF/WF/LDPE）。对这些复合材料进行拉伸、弯曲、冲击等力学性能测试，有效提高木塑复合材料的拉伸强度、弯曲强度、冲击强度等力学性能。

1.5.3 本论文创新点

通过上述三个内容的研究，本论文具有以下两个创新点：

(1) 相容剂制备方法创新：采用低共熔溶剂对 PE 基体进行预处理制备马来酸酐接枝聚乙烯相容剂，为提高相容剂接枝率和粘接强度提供了新方法。低共熔溶剂可对 PE 表面结构重构，增强 PE 反应活性，降低结晶度，使 MAH 接枝率提升 10%以上，且该方法绿色环保，可降解、回收利用。

(2) 全面性能研究：系统研究了低共熔溶剂体系的相容剂对木塑复合材料、短切碳纤维增强木塑复合材料和长连续碳纤维增强木塑复合材料多种性能的影响，涵盖力学性能、热性能、耐水性能等多个方面，深入揭示了相容剂在不同纤维增强体系中的作用机制。

第2章 基于低共熔溶剂体系的马来酸酐接枝聚乙烯相容剂的制备及性能研究

2.1 引言

马来酸酐接枝聚乙烯 (MAH-PE) 具有双重作用, 即有聚乙烯的良好加工性能及其它优异性能, 又有马来酸酐分子的极性特性, 其可通过提高两组分间的结合力, 达到改善两种组分极性差异的效果, 例如可改善木塑复合材料中因两种组分极性相差过大, 而无法达到生产使用的要求, 提高木塑材料的综合性能的目的。近年来, 马来酸酐接枝聚乙烯在木塑复合材料的制备中广泛应用, 并称其为相容剂。

目前, 相容剂的加工方式主要包括溶液接枝、熔体接枝和辐射接枝, 其均为常用的化学改性技术, 通常用于改善聚合物性能。然而, 传统的接枝物共聚方法存在明显的缺点。熔体接枝中 MAH 单体会在高温下的挥发及通常适用于低分子量的接枝反应, 而溶液接枝虽然可以使各组分充分, 但由于丙酮等有毒溶剂难以回收, 对人类和环境有害, 后处理比较麻烦, 对于辐射接枝, 需要昂贵的工具设备来提供高能射线, 其只适用于特定情况, 如实验所需, 无法投入日常工业生产, 而且上述方法均存在接枝率低的难题尚未解决。

低共熔溶剂是一种绿色溶剂, 可降解, 也可回收利用, 具有高效溶解、溶胀、表面限域化学修饰等功能, 广泛用于电沉积、萃取分离、催化反应、材料制备等领域。低共熔溶剂对 PE 的作用主要包括对 PE 表面结构重构, 增加熔体接枝过程中 MAH、引发剂对 PE 的渗透。目前低共熔溶剂作用 PE 粒子的报道还非常有限, 经低共熔溶剂作用后, PE 的聚集态、形貌、反应活性如何改变, 对马来酸酐接枝率是否产生影响, 均未见报道。为此, 本文采用低共熔溶剂对 PE 基体进行预处理, 以期研发低 MAH 含量、高接枝率和高粘接强度的相容剂提供新路径。

2.2 实验原料及设备

2.2.1 实验原料

表 2-1 实验原料及规格

原料	规格	生产厂家
马来酸酐	分析纯	南京试剂
低密度聚乙烯 (LDPE)	熔融指数为 0.2-1.0g/10min	中国石油大庆石化公司
氯化锌	分析纯	南京试剂
乳酸	分析纯	永大试剂
过氧化二异丙苯 (DCP)	工业品	佛山市圣亿塑料化工有限公司
氢氧化钾	分析纯	国药集团化学试剂有限公司
盐酸	分析纯	国药集团化学试剂有限公司
二甲苯	分析纯	国药集团化学试剂有限公司
丙酮	分析纯	国药集团化学试剂有限公司
异丙醇	分析纯	国药集团化学试剂有限公司
无水乙醇	分析纯	国药集团化学试剂有限公司
酚酞指示剂	分析纯	国药集团化学试剂有限公司

2.2.2 实验设备

表 2-2 实验设备及型号

设备名称	设备型号	生产厂家
集热式恒温加热磁力搅拌器	DF-01S	上海秋佐科学仪器有限公司
高速混合机	SHR-10A	张家港通沙塑机公司
扫描电子显微镜	S-4800	日本日立公司
傅里叶红外光谱仪	Spectrum Two	美国 Perkin-Elmer 公司
X-射线衍射仪	D ₈ 系列	德国布鲁克公司
热重分析仪	DTG-60H	日本岛津公司

2.3 实验部分

2.3.1 样品制备

2.3.1.1 低共熔溶剂的制备及其对 PE 粒子的预处理

首先配制物质的量比为 1:2 的氯化锌/乳酸低共熔溶剂 (以下简称为 ZnCl₂/LA), 配制工艺具体操作如下: 称取 90g 乳酸放入锥形瓶中, 后加入 68g

氯化锌，在 80℃下加热搅拌溶解，直至氯化锌完全溶解，制得澄清透明的溶剂体系。

取 200gPE 粒子放入烧杯中，加入 100mL 预先制备的氯化锌/乳酸低共熔溶剂，加热至 60℃，持续搅拌 24h，后过滤制得预处理后的 PE 粒子，命名为 DPE。

2.3.1.2 马来酸酐接枝

称取一定配比的过氧化二异丙苯（DCP）和马来酸酐（MAH），与低共熔溶剂预处理的 PE 粒子共同倒入 SHR-10A 型高速混合机中（LDPE:DCP:MAH=1000:4:15），充分混合。将混配好的物料倒入 CL300g 螺旋上料机料斗，定量喂入 SJZ65 双螺旋挤出机中，反应挤出条件如表 2-2 所示；物料在经熔融、熔体混合后进行接枝反应，再通过模塑成条、水冷、切粒、风干即得接枝产物，命名为 MAH-DPE。后通过对接枝产物进行干燥、接枝纯化，除去接枝产物中未发生接枝的 MAH，以免对后续测试产生影响，后存样，用于测试。

表 2-3 马来酸酐接枝聚乙烯挤出工艺系数

一段/℃	二段/℃	三段/℃	四段/℃	五段/℃	主机螺杆	喂料螺杆
					转速 (r/min)	转速 (r/min)
150℃	190℃	190℃	190℃	170℃	90	2

试验同时进行了未经低共熔溶剂处理 PE 粒子的马来酸酐接枝(MAH-PE)，用于对比实验。

2.3.2 测试与表征

2.3.2.1 微观形貌观察

采用扫描电子显微镜（SEM，德国 ZEISS Sigma 300）观察低共熔溶剂的处理对 PE 粒子的溶解状况及其形貌特征，具体测试是对其进行喷金处理，喷金时长 20s，电流 10mA，扫描电镜工作电压为 5kV，实验同时对处理前后聚乙烯样品进行检查，进行对比分析。

2.3.2.2 红外光谱分析

采用傅里叶变换红外光谱仪（FTIR，美国 Thermo Scientific Nicolet iS20，波数范围 400~4000cm⁻¹）对低共熔溶剂及处理前后聚乙烯样品进行测试分析，以确定低共熔溶剂结构的形成及低共熔溶剂处理前后对 PE 粒子功能团和化学键的影

响，具体采用 ATR 模式，分辨率为 4cm^{-1} ，扫描次数为 20 次。

2.3.2.3 X 射线相分析

通过使用 X 射线衍射仪(XRD, 日本 Rigaku SmartLab SE, 衍射角范围 $5^\circ\sim 90^\circ$, 扫描速度 $2^\circ/\text{min}$) 对处理前后聚乙烯样品进行表征, 以确定低共熔溶剂的处理对 PE 粒子的聚集态结构是否发生变化, 揭示原子在空间的排列方式和分子聚集状态之间的关系。通过与单晶 X 射线衍射分析相结合, 可以确定分子的堆积模式, 从而深入了解其分子结构和性质。

2.3.2.4 接枝率测定

称取 2g MAH-DPE 样品, 80°C 真空干燥 20 小时至恒重, 溶解于 80mL 二甲苯 (100°C), 倒入 60mL 丙酮中搅拌 40 分钟, 抽滤并冲洗, 干燥备用。取 1g 纯化样品, 溶于 120mL 二甲苯 (100°C), 冷却至 80°C 后加入 15mL 氢氧化钾-乙醇溶液, 加热搅拌 60 分钟, 趁热加酚酞指示液, 用盐酸-异丙醇溶液反滴定至乳白色, 记录体积。其接枝率根据式计算:

$$G_x = \frac{(C_1V_1 - C_2V_2) \times 98.06 \times 10^{-3}}{2m} \times 100\% \quad (2-1)$$

式中: G_x —接枝率; C_1 —KOH-乙醇溶液的浓度, mol/L; V_1 —KOH-乙醇溶液的体积, mL; C_2 —HCl-异丙醇溶液的浓度, mol/L; V_2 —反应的 HCl-异丙醇溶液的体积, mL; m —接枝物的质量, g。

2.4 结果与讨论

2.4.1 ZnCl_2/LA 体系表征

制备的 ZnCl_2/LA 体系溶液如图 2-1a 所示, 为澄清透明的粘稠状液体。红外光谱结果见图 2-1b, ZnCl_2/LA DES 体系两种组分特征峰偏移和重叠标志着 ZnCl_2/LA 体系的形成。LA 中的 3344cm^{-1} 处的 O-H 基团在 ZnCl_2/LA 中产生偏移, 红移到 3349cm^{-1} 。在 1731cm^{-1} 对应的羰基 ($\text{C}=\text{O}$ 拉伸), 1450cm^{-1} ($-\text{CH}_3$ 弯曲) 和 1124cm^{-1} (羧酸和醇基 C-O 基的拉伸) 紫移至 1616cm^{-1} , 1452cm^{-1} 和 1117cm^{-1} 。此外, LA 红外光谱和 ZnCl_2/LA 红外光谱在 1375cm^{-1} , 1211cm^{-1} 和 1031cm^{-1} 和 1038cm^{-1} 处还存在部分特征峰重叠现象。上述结果表明 ZnCl_2 和 LA 形成了稳定均质的 ZnCl_2/LA 体系。

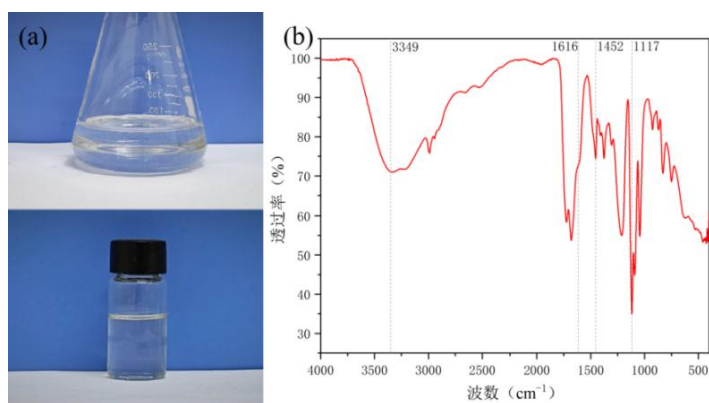


图 2-1 ZnCl₂/LA 实物图及红外光谱：（a）实物；（b）FTIR

2.4.2 低共熔溶剂处理后的 DPE 测试表征

2.4.2.1 微观形貌分析

由图 2-2 可知，原 PE 表面较为光滑，在 SEM 分辨率范围内没有明显凹坑、裂纹（图 2-2a）。另一方面，预处理后 DPE 粒子的表面结构是粗糙的（图 2-2b），存在明显的凹坑、裂纹和凸起等溶解痕迹，表明了 PE 在处理过程其发生了一定的溶解刻蚀作用。

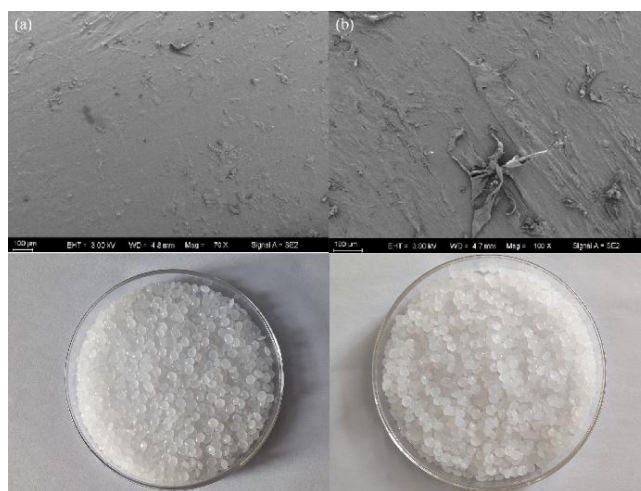


图 2-2 低共熔溶剂预处理 PE 粒子前后的扫描电镜图像及实物图：（a）原 PE；（b）

DPE

2.4.2.2 红外光谱分析

为确定 ZnCl₂/LA 处理对 PE 粒子是否产生影响，需要进行粒子的红外光谱进行比对分析，通过观察吸收光谱曲线中各官能团的峰值，来确定官能团的消耗与形成。图 2-3 示出了预处理前后 PE 粒子的红外光谱，结果可知预处理后 DPE 粒子在 1003-1133cm⁻¹、1610-1700cm⁻¹ 两个波段的吸收信号增强，两波段分别对应 PE 粒子表面的 C-O、C=O 特征吸收，表明经 ZnCl₂/LA 体系预处理后，PE 粒

子表面发生了限域化学改性,含氧基团增加,极性增强,有利于其反应活性增加,促使熔体接枝过程中接枝单体、接枝引发剂对聚乙烯颗粒的渗透。

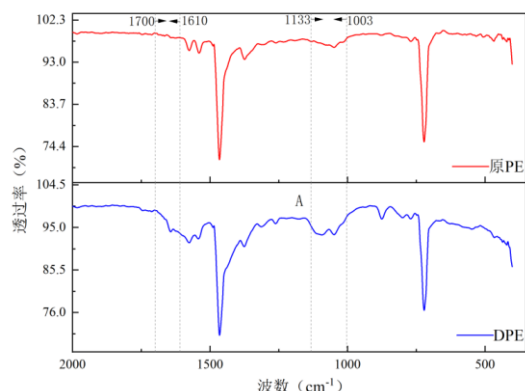


图 2-3 低共熔溶剂预处理 PE 粒子前后的红外光谱

2.4.2.3 聚集态结构

图 2-4 进一步示出了预处理前后 PE 粒子的 XRD 谱图,结果可知经低共熔溶剂处理后,在 2θ 为 21.27° 和 23.65° 处出现很强的衍射峰,对应着 PE 的(110)和(200)晶面。通过对比发现, DPE 的 XRD 谱图与 PE 的 XRD 谱图基本一致,未见新的衍射峰,而预处理后 DPE 粒子的衍射峰强明显变弱,说明链结构大分子的 PE 发生了一定的溶解解聚,导致其结晶度变小,无定形区增加,聚集态结构变得更为疏松,这得益于低共熔溶剂的溶胀作用,意味着后续的接枝反应更容易发生。

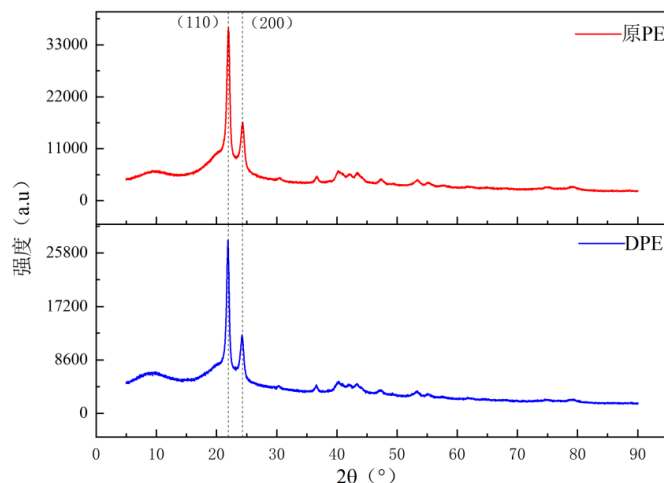


图 2-4 低共熔溶剂预处理 PE 粒子前后的 XRD 谱图

通过图 2-5 可以看出, PE 与 DPE 的 TG 和 DTG 曲线峰形几乎一致,说明 ZnCl_2/LA 体系处理并没有改变 PE 主体结构的热分解过程。从 TGA 测试结果可

以看出将原 PE 分解温度为 296°C，重量下降了 96.77%，DPE 的热分解开始于 284°C，减重 97.57%。说明 DPE（296°C）相比于 PE（296°C）在相对较低的初始分解温度分解更多 PE 量，表明 PE 在 ZnCl_2/LA 体系处理降解过程中聚乙烯链产生了氧化断裂，降低了链分子量，使其在较低的温度下更容易降解，有利于促进马来酸酐的接枝。

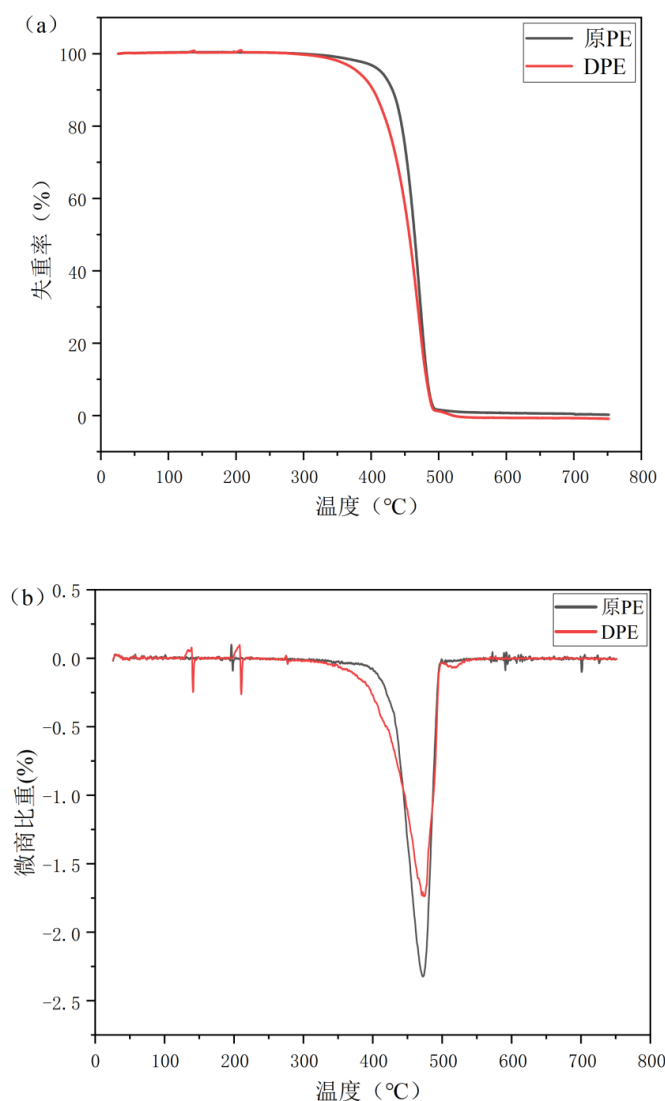


图 2-5 低共熔溶剂预处理 PE 粒子前后的 TG、DTG 谱图：(a)TG；(b)DTG

2.4.3 MAH-DPE 接枝率测定

如图 2-6 对 MAH-DPE 纯化后的样品进行红外光谱测试，可以发现在 1788cm^{-1} 的位置处有明显的羰基吸收峰，表明马来酸酐被成功接枝到 PE 主链上。

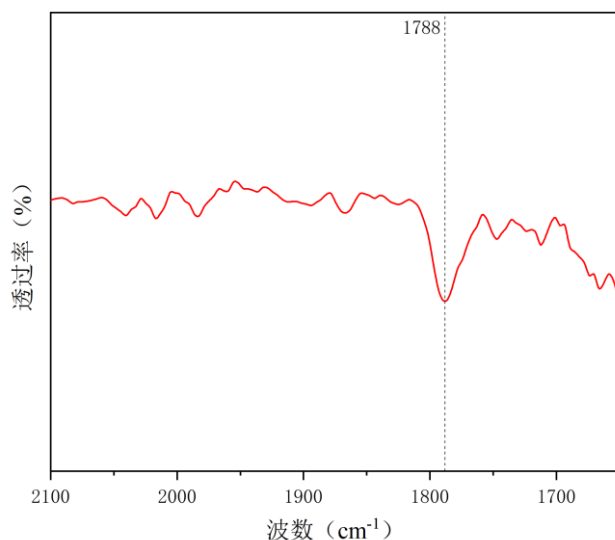


图 2-6 低共熔溶剂预处理 MAH-DPE 粒子的红外光谱

取不同批次中制备的 MAH-PE 和 MAH-DPE 两种接枝样品，通过对接枝样品纯化，采用酸碱滴定法测试期接枝率，具体接枝结果如图 2-7 所示。可以看出经 ZnCl_2/LA 体系预处理的 DPE 粒子，马来酸酐的接枝率提升 10% 以上，这得益于 ZnCl_2/LA 预处理，一方面增强了 PE 粒子的反应活性，另一方面降低了 PE 粒子原有的结晶度，无定形区增加，DCP、MAH 更容易渗透到 PE 基体内部，有利于马来酸酐的接枝。

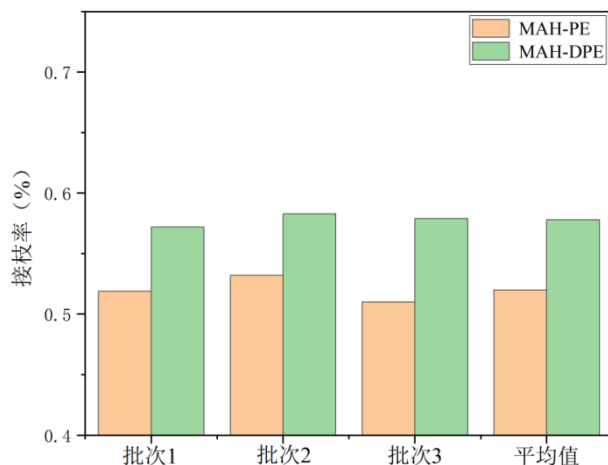


图 2-7 低共熔溶剂预处理对 PE 粒子的接枝率的影响

2.5 本章小结

(1) 经 ZnCl_2/LA 体系处理后，PE 粒子表面存在溶解痕迹，发生了限域化学改性，含氧基团增加，极性增强，反应活性增加，表明 ZnCl_2/LA 体系处理使

结晶度变小,无定形区增加,有利于马来酸酐接枝的产生。

(2) 对预处理 PE 粒子的接枝产物,通过对 MAH-DPE 和 MAH-PE 各组接枝率比较,发现经 ZnCl_2/LA 体系预处理的 PE 粒子,相比于原 PE,马来酸酐的接枝率提升 10%以上,表明在 ZnCl_2/LA 体系下,对 PE 预处理可有效促进马来酸酐的接枝反应,具有高效节能的优点。

第3章 MAH-DPE 在碳纤维增强木塑复合材料中的应用

3.1 引言

在木塑复合材料的实际制备过程中,木纤维与塑料基体之间存在着显著的不相容性问题。木纤维是一种亲水性的天然有机材料,其表面富含大量的羟基等极性基团,具有较高的表面能;而塑料基体大多为疏水性的非极性聚合物,如聚乙烯(PE)、聚丙烯(PP)和聚氯乙烯(PVC)等,表面能较低。这种极性差异导致木纤维与塑料基体在复合过程中难以实现良好的界面结合,使得复合材料内部存在大量的界面缺陷,在受到外力作用时,容易在界面处发生应力集中,从而导致材料的力学性能下降,如拉伸强度、弯曲强度和冲击强度等性能指标不理想。此外,界面相容性差还会影响复合材料的加工性能,使得材料在成型过程中容易出现分层、气泡等缺陷,降低了产品的质量和生产效率。

为了有效解决木纤维与塑料基体之间的不相容问题,提高木塑复合材料的综合性能,相容剂应运而生。相容剂作为一种能够改善不相容聚合物共混体系界面性能的助剂,在木塑复合材料领域发挥着至关重要的作用。它通常含有与木纤维和塑料基体能够发生化学反应或物理吸附的活性基团,通过在木纤维与塑料基体之间形成化学键合或较强的物理作用力,降低了两相之间的界面张力,增强了界面的粘结强度,从而有效改善了复合材料的力学性能、加工性能以及其他性能。而碳纤维作为增强相,其含量在碳纤维增强木塑复合材料的力学性能调控中扮演着举足轻重的角色。适量增加碳纤维含量,能够显著提升材料的拉伸强度、弯曲强度以及冲击强度等关键力学指标,有效增强材料的结构稳定性与承载能力。然而,若碳纤维含量过高,反而可能引发分散不均等问题,导致材料性能下降。因此,精确把控碳纤维含量是优化材料力学性能的核心要点。

研究相容剂对木塑复合材料性能的影响,不仅有助于深入理解木塑复合材料的界面增强机理,为材料的配方设计和制备工艺优化提供理论依据,还能够推动木塑复合材料在更多领域的广泛应用,进一步拓展其市场空间。通过合理选择和使用相容剂,可以显著提高木塑复合材料的性能,使其在一些对材料性能要求较高的领域,如高端建筑装饰材料、汽车零部件等方面得到应用,从而满足不同行业对高性能环保材料的需求。此外,对相容剂的研究还有助于降低木塑复合材料

的生产成本,提高生产效率,减少资源浪费,符合可持续发展的战略要求。因此,深入研究相容剂对木塑复合材料的影响具有重要的理论意义和实际应用价值。

3.2 实验原料及设备

3.2.1 实验原料

表 3-1 实验原料及规格

原料	规格	生产厂家
木纤维	60 目, 含水率<3%	哈尔滨市永旭实业人 造板公司
低密度聚乙烯 (LDPE)	熔融指数为 0.2-1.0g/10min	中国石油大庆石化公 司
马来酸酐接枝聚乙烯 (MAH-PE/MAH-DPE)	自制	自制
短切碳纤维	24K(1K 代表一束中有 1000 根单 丝), 长 6mm, 含水率<3%	沈阳中恒复合材料有 限公司
长连续碳纤维	12K, 200g/m ² , 厚度为 0.111mm	沈阳中恒复合材料有 限公司

3.2.2 实验主要设备

表 3-2 实验设备及型号

设备名称	型号	生产厂家
高速混合机	SHR-10A	张家港通沙塑机公司
傅立叶变换红外光谱仪	Magna-IR560	美国 Nicolet 公司
电子蠕变试验仪	RD-20D	长春科新试验仪器有限
动态热机械分析仪	DMA Q800	美国 TA 公司
双螺杆挤出机	SJSH30/SJ45	南京橡塑机械厂
环境扫描电子显微镜	QuanTa200	荷兰 FEI 公司
冲击试验机	JC-25	承德精密试验机公司
万能力学试验机	RGT20A	深圳瑞格尔仪器公司公司
哑铃状试样制样机	XYZ-12	承德市金建检测仪器有限公司
电热恒温干燥箱	DHG-9140	上海益恒实验仪器有限公司

表 3-2 实验设备及型号		续前表
设备名称	型号	生产厂家
电子天平	LD31001	沈阳龙腾电子称量仪器有限公司
精密台锯	XJ-300	哈尔滨特种塑料制品有限公司
塑料模压成型机	SL-6	哈尔滨特种塑料制品有限公司

3.3 实验部分

3.3.1 木塑复合材料的制备

该图为木塑复合材料（WF/LDPE）的制备过程，如下工艺流程图（图 3-1）。涵盖了从原料准备、反应操作到产品性能测试的各个关键环节，有助于直观理解本研究的核心工艺内容。

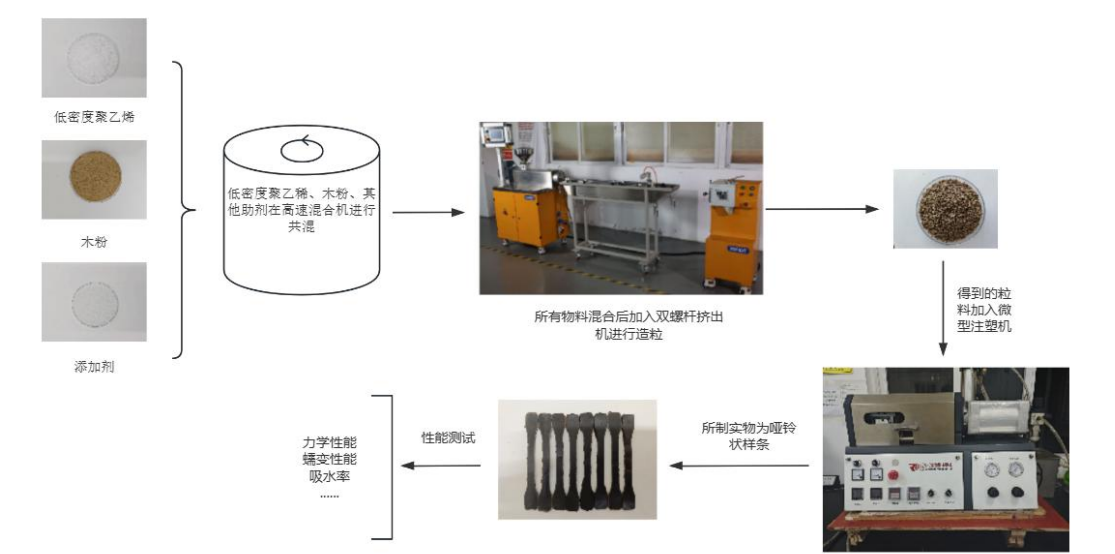


图 3-1 木塑复合材料的制备流程图

(1) 木塑复合材料（WF/LDPE）物料混合

实验选用 60 目杨木粉，因其含大量羟基和挥发性物质，需在 100℃鼓风干燥箱中干燥至含水率低于 3%，以去除水分和挥发物，避免加工中产生孔隙、表面不平整及力学性能下降等问题。木塑复合材料的性能受木纤维与塑料界面相容性影响，本实验结合机械搅拌和双螺杆挤出造粒两种混合方法，以提高增强相分散均匀性和界面相容性。详细的原料配比见表：

表 3-3 木塑复合材料原料配比

WF	LDPE	MAH-PE/MAH-DPE	添加剂
60	36	2	2

(2) 木塑复合材料（WF/LDPE）双螺杆挤出造粒

将原料送入双螺杆挤出机，挤出形成长条状物料，随后进行造粒。挤出效果受螺杆转速、温度及压力的综合影响：转速过快或过慢都会影响挤出质量；温度过高可能导致物料降解、表面粗糙及强度降低，而温度过低则会导致塑化不充分、混合不均匀；此外，需保持稳定的加料速度。挤出造粒过程中，各区的温度设置如下表所示，螺杆转速设定为 90r/min，喂料速度为 2r/min。

表 3-4 木塑复合材料挤出工艺系数

					主机螺杆	喂料螺杆
一段/℃	二段/℃	三段/℃	四段/℃	五段/℃	转速	转速
					(r/min)	(r/min)
150℃	190℃	190℃	190℃	170℃	90	2

如图 3-2 示是双螺杆挤出的实验装置及通过双螺杆挤出机所制备出的实物图，从左到右分别为（a）MAPE 挤出制备实物图、（b）木塑复合材料挤出制备实物图、（c）短切碳纤维增强木塑复合材料挤出制备实物图。

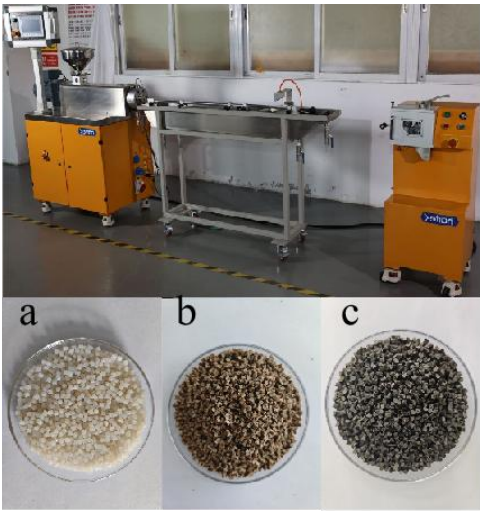


图 3-2 双螺杆挤出机及所制备实物图

(3) 木塑复合材料（WF/LDPE）注塑成型工艺

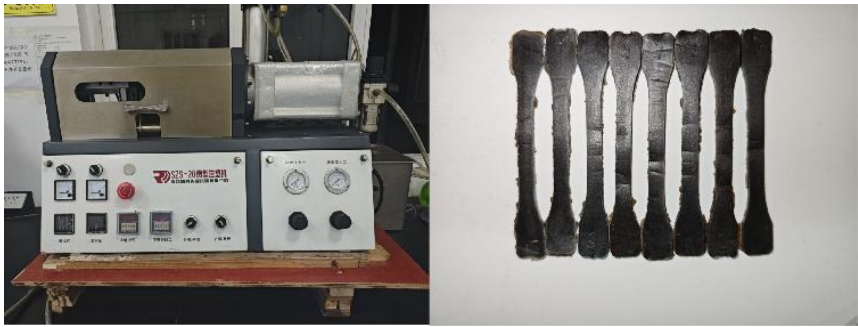


图 3-3 微型注塑机及所制实物图

将上述得到的粒料加入微型注塑机，注塑成型得到宽度为 10-8mm、厚度为的哑铃状样条，其中料筒温度为 180℃，模具温度为 170℃，注射压力 5MPa,注射速度 5mm/s。注塑机中料筒温度、模具温度等均影响样品的稳定，如筒温度过高会使塑料分解、变色，影响产品的物理性能和外观；料筒温度过低则会导致塑料塑化不达标，影响产品流动性，使产品出现缺料、表面不光泽等，而提高模具温度可以改善产品的表面光泽度和流动性，但会延长冷却时间；降低模具温度则可以加快冷却速度，但可能会导致产品表面产生缺陷。

3.3.2 短切碳纤维增强木塑复合材料的制备

短切碳纤维增强木塑复合材料（SCF/WF/LDPE）的制备涉及一系列复杂且严谨的步骤。如图 3-4 所示的制备流程图，详细展示了从原料、混合，到木塑材料的成功制备，再到其在不同类型性能测试的全过程，为深入剖析本工艺提供了清晰的指引。

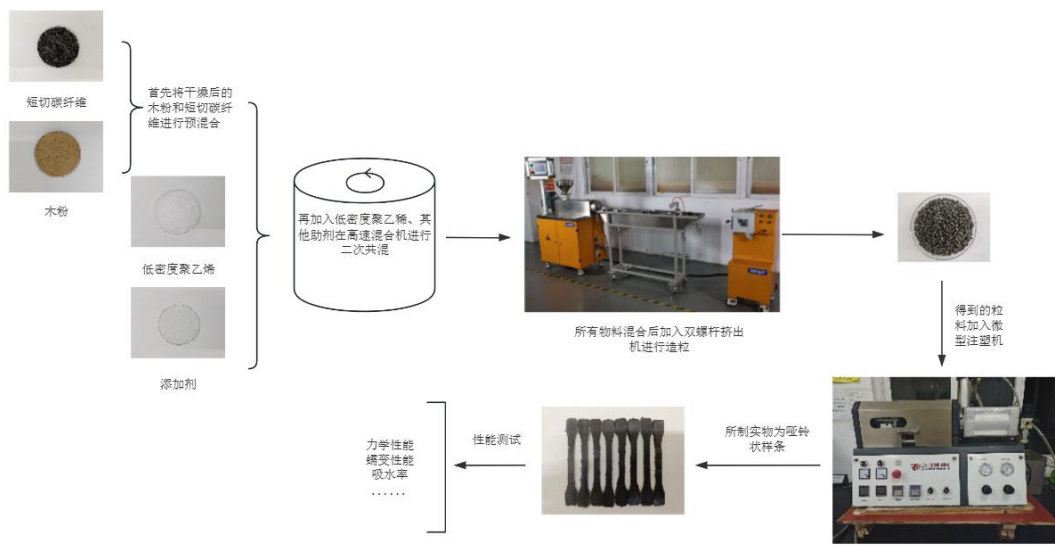


图 3-4 短切碳纤维增强木塑复合材料的制备流程图

(1) 短切碳纤维增强木塑复合材料 (SCF/WF/LDPE) 物料混合

在本实验中选用了挤出成型技术作为主要工艺方法。考虑到碳纤维易于产生团聚的特性,我们在物料混合前采取了预处理步骤:先将干燥的木粉与短切碳纤维进行初步混合。随后,再将低密度聚乙烯、相容剂及其他辅助添加剂一并加入高速混合机中,进行充分的二次混合处理。详细的原料配比见表:

表 3-5 短切碳纤维增强木塑复合材料原料配比

WF	SCF	LDPE	MAH-PE/MAH-DPE	添加剂
60	0	36	2	2
58	2	36	2	2
56	4	36	2	2
54	6	36	2	2
52	8	36	2	2
50	10	36	2	2
48	12	36	2	2
46	14	36	2	2
44	16	36	2	2

(2) 短切碳纤维增强木塑复合材料 (SCF/WF/LDPE) 双螺杆挤出造粒

经过充分混合的预混料投入双螺杆挤出机进行挤出,物料在高温和剪切力的作用下,实现纤维的充分分散,从而更有效地实现对增强纤维的包覆效果。挤出造粒工序双螺杆各区的温度设置如表 3-4。

(3) 短切碳纤维增强木塑复合材料 (SCF/WF/LDPE) 注塑成型工艺

同上述 3.3.1 注塑成型工艺,注塑成型得到宽度为 10-8mm、厚度为的哑铃状样条,其中料筒温度为 180℃,模具温度为 170℃,注射压力 5MPa,注射速度 5mm/s。

3.3.3 长连续碳纤维增强木塑复合材料的制备

为更清晰地呈现长连续碳纤维增强木塑复合材料 (LCF/WF/LDPE) 的制备过程,以及板材结构工艺、热压成型的具体步骤,特绘制如下工艺流程图(图 13)。该图涵盖了从原料准备、操作到产品性能测试的各个关键环节,有助于直观理解本研究的核心工艺内容。

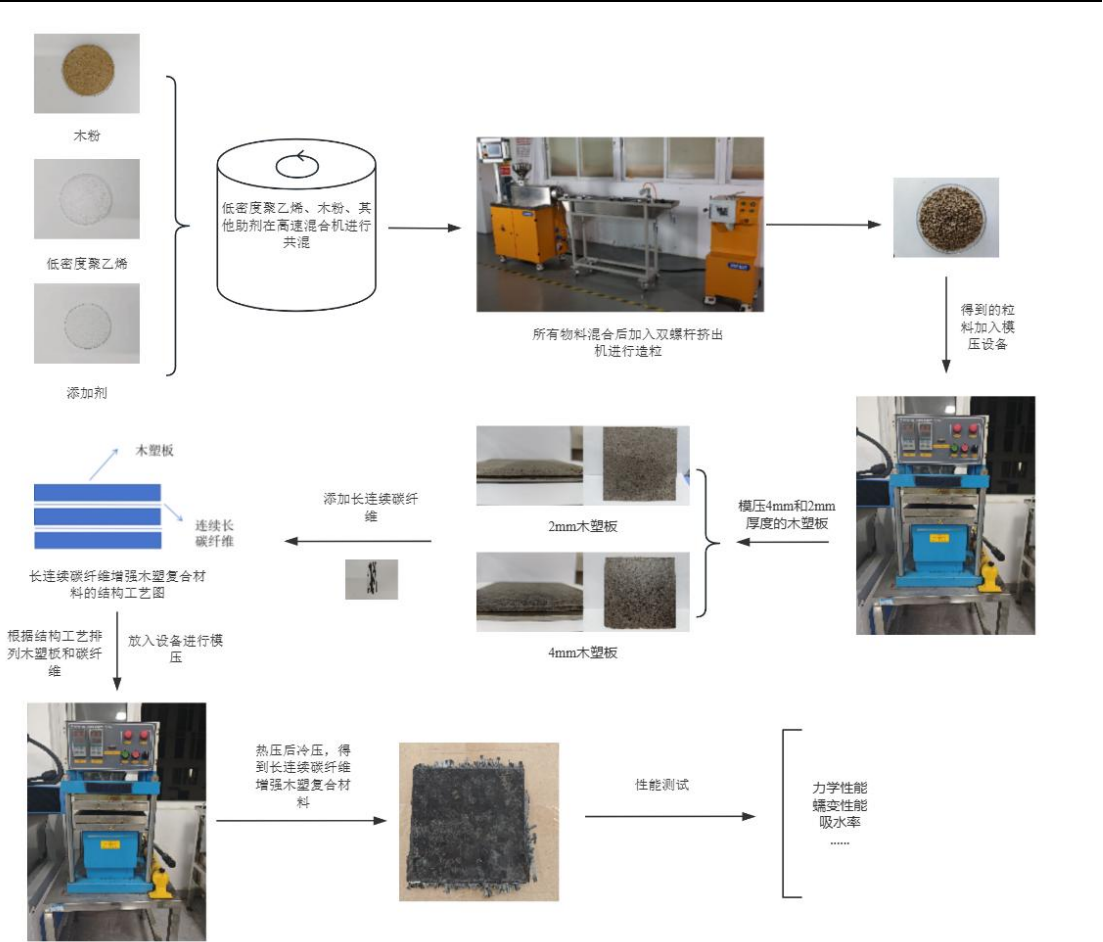


图 3-5 长连续碳纤维增强木塑复合材料的制备流程图

(1) 长连续碳纤维增强木塑复合材料（LCF/WF/LDPE）物料混合与造粒

同上述 3.3.1 物料混合工艺进行混合，本实验中木粉按照木塑复合材料的比例仍定为 60%，长连续纤维设置为重量比，其为 6%。主要原料配比如表 3-6 所示

表 3-6 长连续碳纤维增强木塑复合材料原料配比

WF	LCF	LDPE	MAH-PE/MAH-DPE	添加剂
60	6	36	2	2

按照既定配比准确称取木粉、低密度聚乙烯（LDPE）、马来酸酐接枝聚乙烯（MAPE）及其他辅助添加剂，将其置于高速混合机中，在 70℃ 的温度环境下进行 10 分钟的充分搅拌，以确保各组分达到均匀混合状态。将混合均匀的物料转移至喂料装置，通过双螺杆挤出机进行熔融挤出处理。挤出后的物料经冷却系统降温后，最终由造粒设备完成造粒工序。双螺杆温度设置同表 3-4。

(3) 模压木塑板材

通过模压成型工艺制备的木塑复合材料,其物理力学性能的优劣在很大程度上取决于模压参数的合理选择。优化后的模压条件能够显著提升复合材料的综合性能表现,使其在强度、韧性等关键指标上获得明显改善。实验中使用的热压机装置、热压模具和压制的板材如下图 3-6 所示:



图 3-6 热压机装置、热压模具、长连续纤维和压制的板材实物图

本实验采用铬钢模具,通过优化热压工艺制备木塑复合板材:设定目标密度 $1\text{g}/\text{cm}^3$,选择 5MPa 压力;基于材料特性确定 170°C 温度(高于 LDPE 熔融点,低于木纤维降解点);根据板材厚度和传热效率设定 5min 热压时间,随后冷压 5min 以确保板材平整。该工艺有效避免了模具热变形,制得形状规整的板材。

实验制备 4mm 和 2mm 两种厚度的木塑板材。启动压机系统,开启冷却水循环装置并接通电源,将工作温度设定为 70°C 。将造粒完成的复合材料按照预定质量均匀铺展于 $150\text{mm}\times 150\text{mm}$ 规格的金属模具型腔内。随后启动带加热功能的压机系统,在预设压力和温度条件下进行合模操作,使物料在型腔内受热熔融并充分填充。待温度升至 170°C 后,维持恒压状态 3 分钟,随后转入 3 分钟的冷却压制阶段。将模具从压机移出,完成制品的脱模工序。

(4) 模压长连续碳纤维增强木塑复合板

本研究采用模压工艺制备 8mm 厚长碳纤维增强木塑复合材料。在完成 4mm 和 2mm 基础木塑板的压制后,在其表面精确铺设 150mm 长的单向连续碳纤维,

确保纤维分布均匀且取向一致。随后在 175℃ 条件下进行 7 分钟热压成型，并辅以等时冷压处理，最终获得结构完整的增强复合材料。

为探究 MAH-DPE 与 MAH-PE 对材料性能的影响机制，同时消除工艺结构因素的干扰，实验设计采用了三种不同的工艺结构方案（如图示）。所有试样均采用 150×150mm 的标准尺寸，由木塑基体层和纤维增强层构成，其中长碳纤维的质量分数控制在 6%。

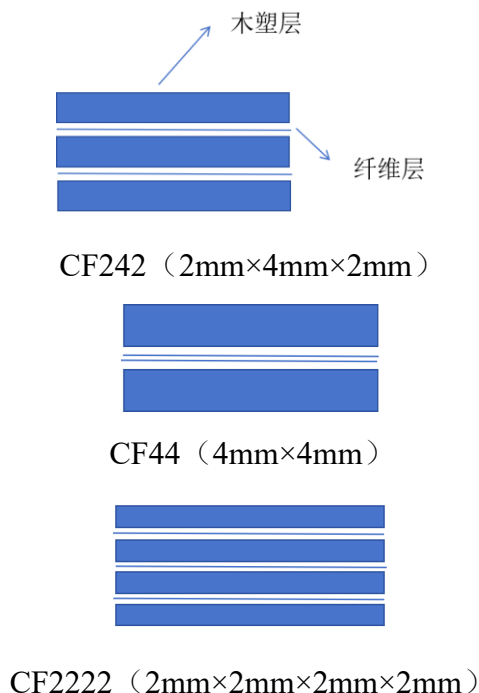


图 3-7 长连续碳纤维增强木塑复合材料的结构工艺图

3.3.4 测试与表征

3.3.4.1 力学性能分析

力学性能测试分别依据相关标准在专用设备上进行。拉伸性能评估采用 ASTM D638-03 标准，使用万能力学试验机以 2mm/min 的速率对标准哑铃型试样进行检测，试样规格为：总长 160mm，夹持端宽 20mm，测试区宽 10mm，标距 100mm，过渡弧半径 76mm，每组设置 8 个平行样本。

弯曲性能测试依照 ASTM D790-03 标准执行，在相同试验机上完成。试样尺寸为 160mm×13mm，支撑跨距设定为 64mm，加载速率保持 2mm/min，每组同样包含 8 个平行试样。

冲击性能评价参照 GB/T 1043.1-2008 标准，采用组合式冲击试验机进行。试样规格为 80mm×10mm，支撑跨距 60mm，测试条件设定为：冲击速度 2.9m/s，

摆锤能量 2J，为确保数据可靠性，每组设置 12 个平行试样。

3.3.4.2 扫描电镜分析

将木塑复合材料液氮冷冻脆断获得平整断面，切取小块后固定于样品台，经喷金处理增强导电性后即可进行形貌观察。

3.3.4.3 傅里叶变换红外分析

采用傅里叶变换红外光谱仪（FTIR，美国 Thermo Scientific Nicolet iS20，波数范围 $400\sim 4000\text{cm}^{-1}$ ）对低共熔溶剂及处理前后聚乙烯样品进行测试分析，以确定低共熔溶剂结构的形成及低共熔溶剂处理前后对 PE 粒子功能团和化学键的影响，具体采用 ATR 模式，分辨率为 4cm^{-1} ，扫描次数为 20 次。

3.3.4.4 24h 蠕变测试

木塑复合材料的蠕变性能研究显示，在破坏载荷 20%的应力水平下进行测试可确保材料处于线性变形区，便于比较不同配方的蠕变特性。研究表明，当应力为破坏载荷的 10%-30%时，材料呈现线性蠕变；超过 50%时则转为非线性变形。

实验在室温（湿度 50%-60%）下使用电子蠕变试验仪进行 24h 蠕变变形测试。注塑试样尺寸为 $100\text{mm}\times 10\text{mm}\times 2\text{mm}$ ，跨距 64mm，恒定载荷 40N，加载速度 20N/S；每组 3 个重复样。

热压木塑分层板试样尺寸为 $150\text{mm}\times 20\text{mm}\times 8\text{mm}$ ，跨距 112mm，载荷和加载速度相同。采用三点弯曲加载方式，。

3.3.4.5 动态热机械分析

动态力学性能测试采用 TA Q800 分析仪，在 $35\sim 150^\circ\text{C}$ 范围内以 $3^\circ\text{C}/\text{min}$ 速率进行温度扫描（1Hz 频率），使用 $35\text{mm}\times 10\text{mm}\times 4\text{mm}$ 矩形试样，采用单悬臂梁模式，以获取聚合物结构的特征信息。

3.3.4.6 吸水率和厚度膨胀率测试

材料的水分响应特性主要通过吸水率和厚度膨胀率两个关键指标来表征。吸水率体现了材料的水分吸收能力，其数值表示为吸收水分质量与材料原始质量的百分比，这一参数直接反映了材料的亲水性，并受到孔隙特征和化学组成等因素的调控。厚度膨胀率则表征了材料在吸水后沿厚度方向的尺寸变化程度，通常采用特定公式计算得出，其数值大小与材料的内在结构和组成密切相关。这两个参

数作为评估材料性能的核心指标，在建筑工程、农业生产、纺织工业等多个领域具有重要的应用价值，特别是在评价材料在潮湿环境中的稳定性和使用寿命方面发挥着关键作用。

实验中将试样浸入 60℃恒温水浴，试样与水面距离超过 1cm，每组测试进行 5 次平行实验，取算术平均值。擦干试件表面水分后，精确测量吸水前后质量（0.01g）及端头、中间部位厚度（0.01mm），计算吸水率（ W_A ）和吸水厚度膨胀率（ T_S ），如式所示。

$$W_A(\%) = \frac{M_t - M_0}{M_t} \times 100\% \quad (3-1)$$

（3-1）中： M_0 为吸水前样条的质量； M_t 为 t 时间时样条的质量。

$$T_S(\%) = \frac{T_t - T_0}{T_t} \times 100\% \quad (3-2)$$

（3-2）中： T_0 为吸水前样条的厚度； T_t 为 t 时刻样条的厚度。

3.4 结果与讨论

3.4.1 MAH-DPE 用于 WF/LDPE 的性能与分析

为了更加深入了解两种相容剂的性能差异，探究在碳纤维的增强效果，需对木塑复合材料开展全面力学性能测试，并且在碳纤维增强木塑复合材料的性能进行对比，从而为材料的优化和应用提供科学依据。

3.4.1.1 WF/LDPE 木塑复合材料拉伸性能分析

从图中可以看出，木塑复合材料的拉伸强度在 15-25MPa 范围内。对于 WF/LDPE 的拉伸性能，与基于 MAH-PE 的复合材料相比，基于 MAH-DPE 的复合材料表现出更高的拉伸强度。如图当配方等其他因素相同时，MAH-DPE 的复合材料的拉伸强度值为 16.31MPa，而 MAH-PE 的复合材料的拉伸强度值为 22.24MPa。这是因为 MAH-DPE 的接枝率更高，提高接枝率，能够增强木粉与塑料基体之间的界面结合力，当接枝率在一定范围内增加时，木粉与 PE 基体之间的相互作用增强，在木粉和聚乙烯基质之间的界面上形成了化学键，从而提高了木粉和聚丙烯基质之间的相容性，使得材料在承受拉伸载荷时，应力能够更有效地在木粉和塑料基体之间传递，从而提高拉伸强度。

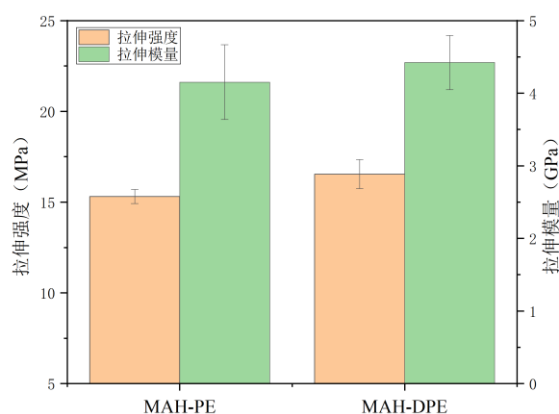


图 3-8 相容剂种类与木塑复合材料拉伸强度和拉伸模量的关系

3.4.1.2 WF/LDPE 木塑复合材料弯曲性能分析

弯曲强度和杨氏模量由三点弯曲试验得到，其值见图。弯曲的 MOR 表现出与拉伸强度相似的变化趋势。木塑复合材料的弯曲 MOR 在 23-35MPa 之间不等，随 MAH-DPE 的添加表现出更高的弯曲强度。MAH-DPE 的复合材料的弯曲强度值为 31.56MPa，而 MAH-PE 的复合材料的弯曲强度值为 24.75MPa。从图中可以看出，在 MAH-DPE 的影响下显著提高了复合材料的 MOE，MOE 值随着木材含量的增加而增加。接枝率的提高有助于改善木粉在塑料基体中的分散性和界面相容性，使木粉与 PE 基体之间的结合更加紧密，在复合材料在受到弯曲载荷时，木粉能够更好地承担应力，提高材料的弯曲强度。

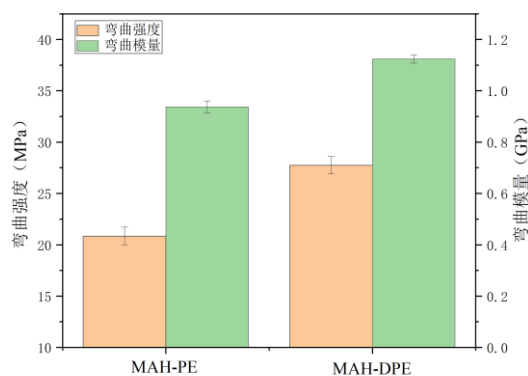


图 3-9 相容剂种类与木塑复合材料弯曲强度和弯曲模量的关系

3.4.1.3 WF/LDPE 木塑复合材料冲击性能分析

在对样品的冲击强度研究中发现，当向材料中添加 MAH-DPE 后，复合材

料的冲击强度得到了提升，提升幅度最高为 21%（如图 3-10 所示）。这一实验结果强有力地再次印证了 MAH-DPE 能够有效改善木粉与塑料之间相容性的假设。因为 MAH-DPE 的加入，接枝率在一定范围内增加，在一定程度上提高复合材料的冲击韧性，因为接枝聚合物能够在木粉与塑料基体之间形成柔性界面层，吸收冲击能量使得材料内部各组分之间的结合更加紧密和稳定，从而大大增强了材料抵抗冲击的能力。

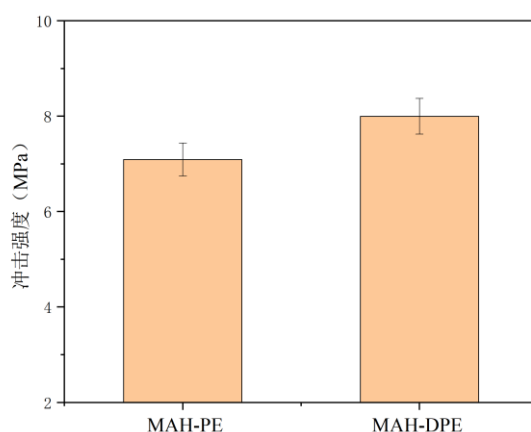


图 3-10 相容剂种类与木塑复合材料冲击强度的关系

3.4.1.4 WF/LDPE 木塑复合材料蠕变性能分析

从图中可以看到 MAH-DPE 有利于减小木塑材料的变形,从复合材料的 24h 蠕变数据可知，经过 24 小时后，MAH-DPE 木塑复合材料的总应变比 MAH-PE 木塑复合材料降低，

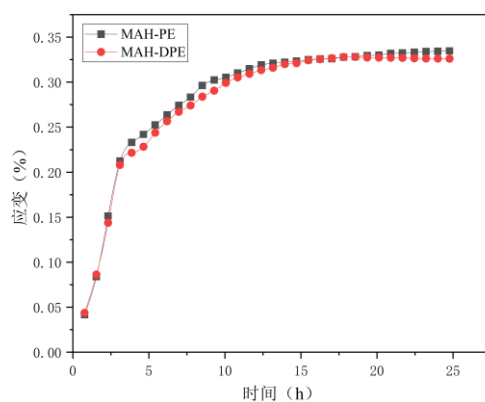


图 3-11 相容剂种类与木塑复合材料的蠕变曲线

在木塑复合材料中，由于塑料基体初性好刚度差，其分子链段活性高容易运

动。MAH-DPE 相较于 MAH-PE 接枝率提升，使木粉抑制塑料分子链的运动，达到木粉与塑料界面结合的更加完善的所求，改善了整个复合材料的蠕变性能。

3.4.1.5 WF/LDPE 木塑复合材料动态热机械性能分析

通过对比两种不同相容剂处理的木塑复合材料的储能模量，可以发现，使用 MAH-DPE 的复合材料储能模量显著提高，这一结果与静态力学性能测试一致，进一步证明 MAH-DPE 能够增强木粉与树脂的结合，从而整体提升复合材料性能。然而，这种差异在低温条件下更为显著，随着温度升高，内部性能变化差距逐渐缩小，表明 MAH-DPE 对复合材料刚度的改善作用在低温时更为明显，而在高温时影响相对较小。

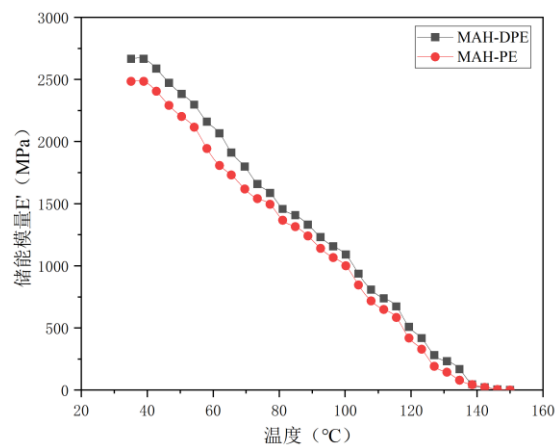


图 3-12 相容剂种类与木塑复合材料的储能模量与温度的关系曲线

3.4.1.6 WF/LDPE 木塑复合材料吸水率和厚度膨胀率分析

通过吸水测试发现，MAH-DPE 与 MAH-PE 木塑复合材料的吸水率均遵循 Fickian 扩散模型，随浸水时间呈典型阶段增长特征。在饱和阶段，MAH-DPE 体系平衡吸水率较 MAH-PE 降低，该差异与动态力学分析中 MAH-DPE 体系较高的储能模量及更低的蠕变应变形成机理关联。木粉-塑料基体的界面缺陷作为优先吸水通道，其形成源于木质素羟基与聚乙烯分子链的极性失配。高接枝率 MAH-DPE 通过分子链缠结密度提升及界面应力传递效率优化，在木粉表面构筑致密缠结网络，更加有效阻隔水分子沿相界面的毛细渗透。热机械性能与蠕变数据的协同分析表明，界面结合强度的提升使复合材料自由体积降低，从而有效抑制水分子扩散。

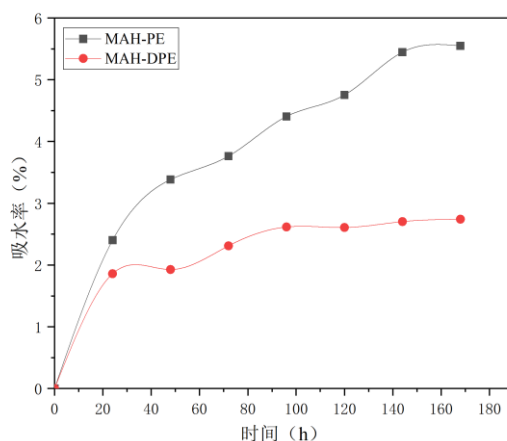


图 3-13 相容剂种类与木塑复合材料的吸水率曲线

实验显示，两种木塑复合材料的吸湿膨胀行为均符合二维扩散控制机制。MAH-DPE 体系经 168h 浸泡后的厚度膨胀率仅为 0.12%，较 MAH-PE 体系的 0.17% 降低 31.8%，该差异与动态力学分析中 MAH-DPE 更高的界面结合强度直接相。蠕变测试表明，MAH-DPE 的 24h 蠕变应变降低，证实其分子链缠结密度增加抑制了水分子渗透引发的自由体积膨胀。木粉-塑料界面作为应力集中区域，高接枝率 MAH-DPE 通过增强相间机械作用，有效阻隔了水分侵入引起的塑化效应。

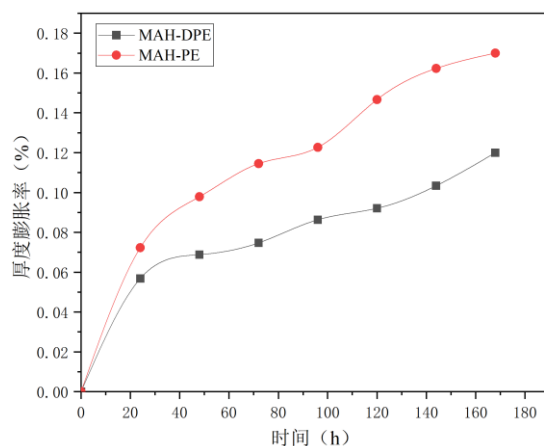


图 3-14 相容剂种类与木塑复合材料的厚度膨胀率曲线

3.4.2 MAH-DPE 用于 SCF/WF/LDPE 的性能与分析

3.4.2.1 SCF/WF/LDPE 木塑复合材料断面分析

通过扫描电镜对静态拉伸应力作用后的碳纤维增强木基复合材料进行观察

(图 3-15) 显示, 当拉伸应力从木塑板中部施加时, 应力通过材料整体传递, 导致试样中部区域发生断裂, 从断裂形貌的电镜图像中可以观察到, 碳纤维增强复合材料的主要失效机制表现为纤维的断裂和拔出过程。在微观结构上, 碳纤维均匀分布在基体材料中, 断裂截面呈现出大量纤维拔出后遗留的空洞结构, 这一现象证实了纤维拔出是重要的能量耗散机制。纤维拔出过程需要克服纤维-基体界面结合力以及拔出摩擦力的双重阻力, 这一特性充分证明了碳纤维与聚乙烯基体之间形成了有效的界面结合。



图 3-15 短切碳纤维增强木塑复合材料的拉伸断面的实物图和扫描电镜

3.4.2.2 SCF/WF/LDPE 木塑复合材料红外分析

红外光谱分析作为一种强大的分子结构表征技术, 能够提供关于材料化学组成和分子结构的详细信息, 对于深入理解短切碳纤维增强木塑复合材料的性能和微观结构具有重要意义。X 射线衍射 (XRD) 技术是一种强大的分析手段, 能够深入揭示材料的晶体结构、相组成以及微观结构信息, 对于研究短切碳纤维增强木塑复合材料的性能和优化其制备工艺具有重要意义。

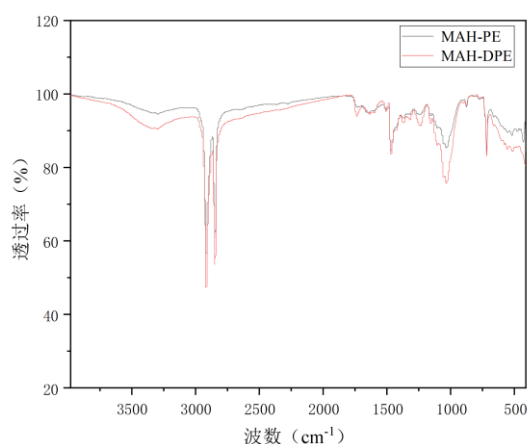


图 3-16 短切碳纤维增强木塑复合材料的红外光谱图

当碳纤维表面的官能团与木粉或塑料基体中的官能团发生化学反应或物理吸附时,会导致红外光谱中吸收峰的位置、强度或形状发生变化。图中 3300cm^{-1} -OH 吸收峰、 2920cm^{-1} 和 2850cm^{-1} C-H 键伸缩振动峰及 1030cm^{-1} 、 1240cm^{-1} C-C 键的伸缩振动峰的显著增强,从增强峰中均体现出碳纤维特征峰,表明原材料与碳纤维共混成功。

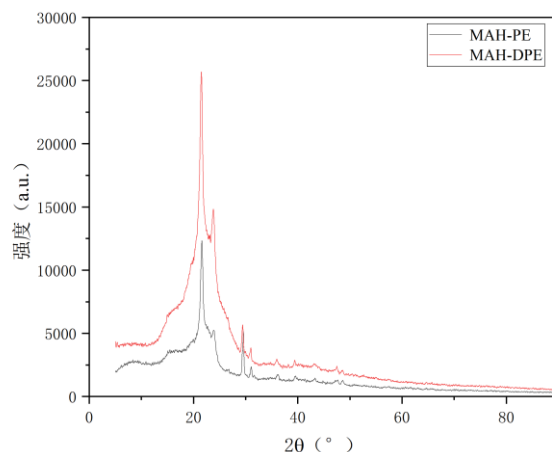


图 3-17 短切碳纤维增强木塑复合材料的 XRD 图谱

当碳纤维与基体之间形成良好的界面结合时,可能会引起基体晶体结构发生一定变化,这些变化可以通过 XRD 图谱观察到。在 21.5° 和 23.81° 处出现了较强的衍射峰,分别对应于 (110) 和 (200) 晶面。随着 SCF 含量的增加,各衍射峰的强度有所增强,峰宽也有所增大。这一现象表明,随着 SCF 的加入,材料的结晶度提高,分子链的排列更加有序,进一步证明了碳纤维与各组分之间的结合较为完善。

3.4.2.3 SCF/WF/LDPE 木塑复合材料力学性能分析

(1) SCF/WF/LDPE 木塑复合材料拉伸性能

由于碳纤维具有卓越的高抗拉强度,科研人员和相关领域的从业者都期望短切碳纤维增强木塑复合材料也能展现出优异的高抗拉性能。实际测试结果正如预期一样,无论是混合 MAH-PE 还是 MAH-DPE 的短切碳纤维增强木塑复合材料,其拉伸强度和模量均显著高于常规的 WPCs 材料。

实验结果表明,在不同测试条件下,随着短碳纤维含量的提升,复合材料的拉伸性能呈现显著变化。拉伸强度和弹性模量均随纤维含量增加而增长,且增长速率呈现先快后慢的趋势。当纤维质量分数达到 12% 时,材料的力学性能达到峰

值，这一现象证实了碳纤维在复合材料中发挥了有效的增强效应，形成了稳定的增强网络结构。

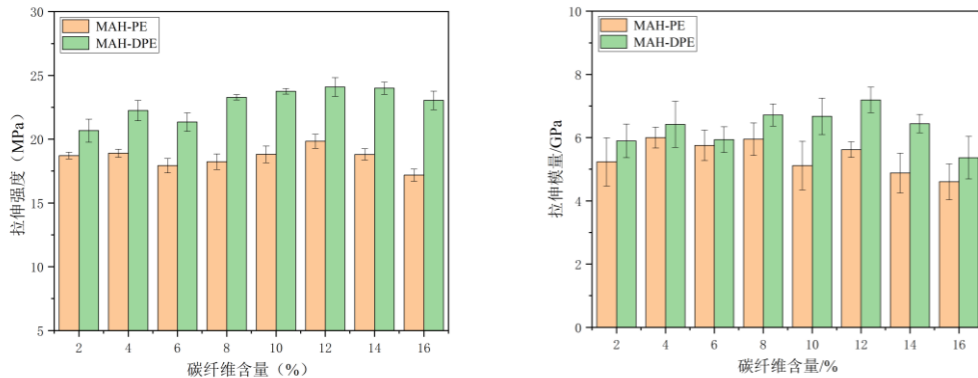


图 3-18 相容剂种类与短切碳纤维木塑复合材料拉伸强度和拉伸模量的关系

添加了 MAH-DPE 的样品（图）与 MAPE-PE 的样品相比，前者的抗拉强度均有大幅度提升，提升幅度达到了 26.08%。这一显著的性能差异很可能是因为 MAH-DPE 接枝率的提升能够同时有效地增强 SCF 与 LDPE 之间以及木粉与 LDPE 之间的界面键合作用，从而使得材料的整体抗拉性能得到提升。在拉伸模量方面，如图所示，无论材料中使用了哪种 MAPE，其拉伸模量的变化范围基本都在 6GPa 左右波动。进一步的分析表明，随着相容剂种类的变化，拉伸模量的变化幅度小。在两种 MAPE 的样本中，MAPE 对杂化复合材料拉伸模量的影响相对较小。虽然添加了 MAH-DPE 的样品的拉伸模量略高于 MAH-PE 的样品，但这种差异并不显著。

实验研究表明，MAH-DPE 改性的短切碳纤维增强木塑复合材料较 MAH-PE 体系具有更高的抗拉强度，但两种 MAPE 对拉伸模量的提升效果均有限。MAPE 虽能改善界面粘附性，但由于其微观改性作用的局限性，对宏观拉伸模量的影响不显著，这一发现为材料优化提供了重要依据。

（2）SCF/WF/LDPE 木塑复合材料弯曲性能

在对样品的性能研究中发现，所有添加了 SCF 的样品，其抗弯强度和模量均显著高于普通的 WPCs（如图 3-19 所示）。这一结果充分表明，SCF 的添加能够有效地改善 WPCs 材料的抗弯性能。

从图中可以看到，短切碳纤维含量为 10% 时弯曲强度达到最大。弯曲模量的变化趋势与弯曲强度相似，随着短切碳纤维含量达到 8%，弯曲模量达到最大。

随着短切碳纤维含量的增加,这些增强相逐渐演变为材料中的主要应力承载单元。高强度碳纤维与相对较低强度的木塑基体之间形成的有效界面结合,显著提升了复合材料整体的载荷承受能力。

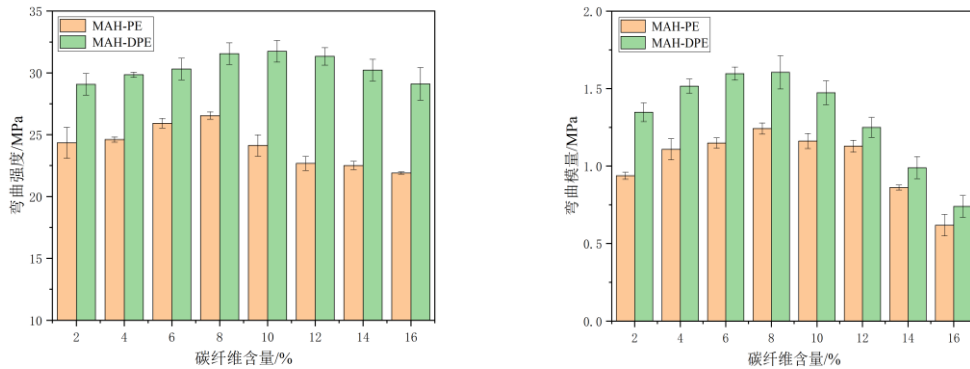


图 3-19 相容剂种类与短切碳纤维木塑复合材料弯曲强度和弯曲模量的关系

进一步对比添加不同 MAPE 的样品后发现,添加了 MAH-DPE 的样品与原有 MAPE 的样品相比,其抗弯强度提升幅度在 36%左右。这一显著的性能提升可以归因于 MAH-DPE 作为 SCF 与塑料之间的相容剂,能够促使纤维在复合材料中更加均匀地排列,从而增强了材料的整体抗弯能力。分析挠曲强度与 SCF 的关系可知,在排除纤维长度影响的情况下,MAH-DPE 对材料抗弯性能的具有改善作用。添加了 MAH-DPE 的样品,其内部纤维排列的均匀性使得材料在承受弯曲载荷时表现更为优异。

MAH-DPE 的添加对于短切碳纤维增强木塑复合材料的抗弯性能有着重要的影响,不仅能够显著提高材料的抗弯强度,还能在一定程度上改变材料弯曲模量与 SCF 之间的相关性。这些研究结果为短切碳纤维增强木塑复合材料的进一步优化和应用提供了重要的理论依据和实践指导,有助于在实际应用中更好地发挥这种材料的性能优势。

(3) SCF/WF/LDPE 木塑复合材料冲击强度

冲击性能测试结果显示,短切碳纤维的引入显著改善了复合材料的抗冲击特性。当纤维含量达到 6%时,材料表现出最佳的冲击强度。然而,随着纤维比例继续增加,由于纤维分散性下降导致的团聚现象加剧,纤维间产生摩擦和缠结,影响了应力的有效传递,最终造成力学性能的降低。

当向材料中添加 MAH-DPE 后,短切碳纤维增强木塑复合的冲击强度得到

了提升，提升幅度在 15%（如图所示）。这一实验结果强有力地再次印证 MAPE 能够有效改善 SCF 与 LDPE 塑料之间相容性的假设。MAH-DPE 的引入在木塑基体中形成柔性界面层，有效吸收冲击能量，保护内部结构。因此适度提高接枝率可显著增强材料的抗冲击性能。

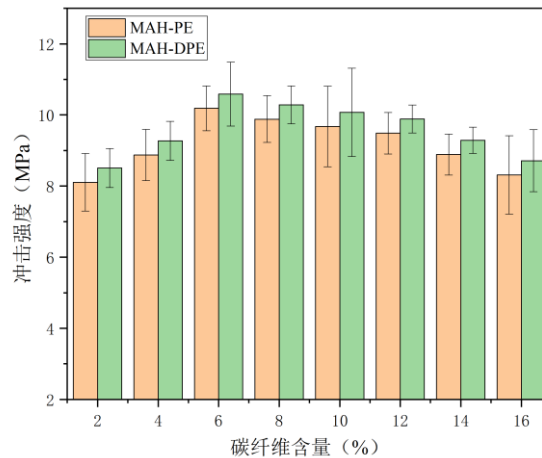


图 3-20 相容剂种类与短切碳纤维木塑复合材料冲击强度的关系

无论样品中添加了哪种 MAPE, SCF 与样品的冲击强度之间都存在着显著的相关性。MAPE 在短切碳纤维增强木塑复合材料中对于提升冲击强度起到了关键作用，并且通过严谨的统计分析，明确了不同条件下样品的最佳因子水平，这些发现为短切碳纤维增强木塑复合材料在实际应用中的性能优化提供了重要的参考依据，有助于进一步挖掘该材料在承受冲击载荷方面的潜力。

3.4.2.4 SCF/WF/LDPE 木塑复合材料蠕变性能分析

基于蠕变力学特性分析，碳纤维增强木塑复合材料表现出显著的时间依赖性形变特征。实验数据显示，在恒定载荷作用下，复合材料的蠕变速率呈现显著衰减趋势，其应变值经非线性增长阶段后渐趋稳态平衡。通过对比 24h 蠕变曲线发现，MAH-DPE 改性体系的总应变较 MAH-PE 体系降低，该现象可归因于界面强化效应与分子运动受限机制的双重作用。在微观层面，塑料基体存在高柔韧性但刚性不足的固有缺陷，其自由体积内高分子链段易发生迁移重组。碳纤维增强相的引入通过三维网络架构形成空间位阻效应，有效抑制基体分子链的滑移运动。值得注意的是，MAH-DPE 体系得益于马来酸酐接枝率提升，其与聚乙烯基体间形成更致密的化学键合界面。这种增强的界面结合强度使应力传递效率提升，通过强化纤维-基体相互作用显著降低分子链段活化能，最终

使复合材料储能模量增加并改善抗蠕变性能。

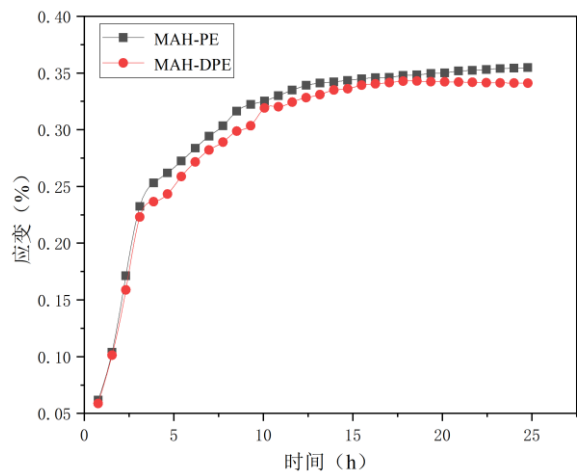


图 3-21 相容剂种类与短切碳纤维增强木塑复合材料的蠕变曲线

3.4.2.5 SCF/WF/LDPE 木塑复合材料动态热机械性能分析

图为碳纤维增强复合材料储能模量与温度的关系曲线

动态力学分析结果显示，复合材料的储能模量随温度升高呈现显著下降趋势。在低温区间（ $<75^{\circ}\text{C}$ ），MAH-DPE 改性的碳纤维增强木塑复合材料表现出更优异的储能模量，这主要归因于马来酸酐基团与树脂基体间形成的强分子间作用力，促进了更致密的界面结合层形成，从而增强了材料的弹性响应特性。然而，当温度超过 75°C 后，分子链段运动活化能降低导致界面应力传递效率下降，使得两种体系的性能差异逐渐缩小。这一现象与静态力学测试结果相互印证，证实了界面结合强度在低温阶段对材料刚度的显著调控作用。

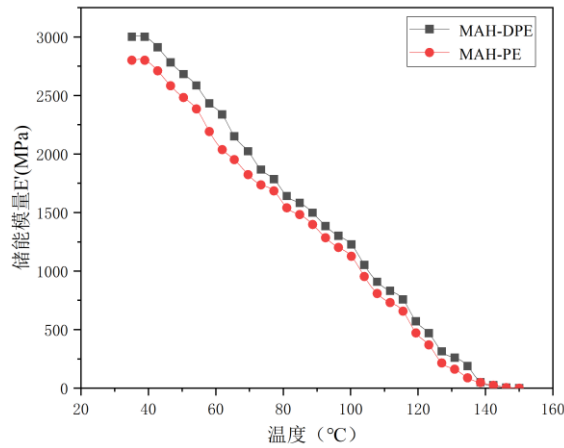


图 3-22 相容剂种类与短切碳纤维增强木塑复合材料的储能模量与温度的关系曲线

从微观机制来看,在低温区域,受限的分子链运动导致分子间摩擦热耗散较少,使得材料保持较高的储能模量。随着温度升高,热激活作用促使非晶区链段和支链开始运动,从热力学角度导致储能模量快速下降而损耗模量相应增加。这一转变过程揭示了温度对聚合物复合材料动态力学行为的显著影响。

3.4.2.6 SCF/WF/LDPE 木塑复合材料吸水率和厚度膨胀率分析

图中展示了 MAH-DPE 和 MAH-PE 两种 SCF/WF/LDPE 木塑复合材料的吸水率随时间的变化曲线。从图中可以看出,两种复合材料的吸水率均随浸水时间的延长而逐渐上升,表明它们都存在吸水现象。然而,与 MAH-PE 相比,MAH-DPE 木塑复合材料的吸水率更低。在浸水 168 小时后,MAH-DPE 短切碳纤维木塑复合材料的吸水率为 2.23%,仅为 MAH-PE 复合材料吸水率 (5.84%) 的 38.2%。这一差异主要源于木粉的亲水性与塑料基体的疏水性之间的界面相容性较差,导致水分易于侵入。高接枝聚合物能够在木粉表面形成疏水层,不仅降低了木粉的吸水性,还增强了木粉与塑料基体之间的界面结合力,从而有效阻止水分在界面处的渗透,显著提升了复合材料的耐水性能。这一结果表明,提高接枝率是改善木塑复合材料耐水性能的有效途径。

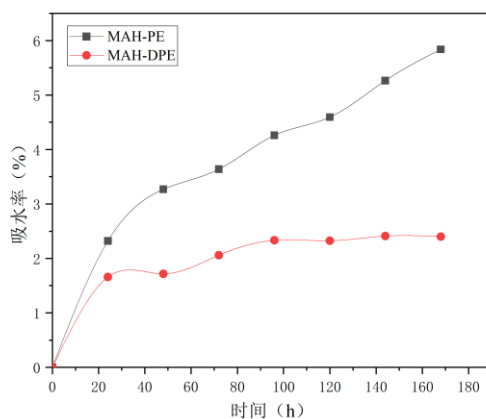


图 3-23 相容剂种类与短切碳纤维增强木塑复合材料的吸水率曲线

从图中可以看出,两种相容剂复合材料在浸水后未出现明显的厚度膨胀现象。然而与 MAH-PE 相比,MAH-DPE 木塑复合材料的吸水厚度膨胀率更低。在浸水 168 小时后,MAH-PE 复合材料的吸水厚度膨胀率为 0.1%,而 MAH-DPE 复合材料的膨胀率仅为 0.09%。这表明,MAH-DPE 在抑制吸水厚度膨胀方面表现更为优异。

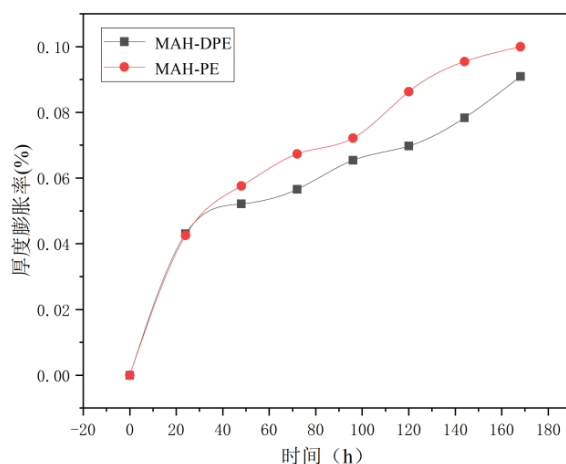


图 3-24 相容剂种类与短切碳纤维增强木塑复合材料的厚度膨胀率曲线

3.4.3 MAH-DPE 用于 LCF/WF/LDPE 的性能与分析

3.4.3.1 LCF/WF/LDPE 木塑复合材料断面分析

通过观察碳纤维增强木基复合材料在静态压缩应力下的弯曲和拉伸行为,可以发现试样中部区域产生了明显的弯曲形变。应力传递路径分析显示,载荷首先作用于第一层纤维板,随后通过中间两层碳纤维束的应力传递,延长了压缩应力平台,最终将应力传递至最外层木纤维板,导致弯曲破坏的发生。随着压缩应力的持续增加,中间层的屈服强度逐步降低,最终引发木纤维板内部结构的破坏。



图 3-25 MAH-DPE 长连续碳纤维增强木塑复合材料断裂图

在弯曲应力作用下,各层板材间未出现分层现象,这一结果证实了所选相容剂具有优异的界面结合强度,充分证明了其选择的合理性和适用性。

3.4.3.2 LCF/WF/LDPE 木塑复合材料力学性能分析

(1) LCF/WF/LDPE 木塑复合材料弯曲强度

长连续碳纤维在不同 MAPE 情况下，对复合板弯曲性能的影响如图所示。从图中可以清晰地看出，随着 MAH-DPE 的添加，复合板的弯曲强度和弯曲弹性模量均提高。具体来看，当碳纤维的用量确定时，在 CF2222、CF44、CF242 三种工艺中，MAH-DPE 相容剂对应的弯曲强度均高于 MAH-PE。例如 CF242 样本，MAH-DPE 下弯曲强度超 20MPa，显著优于 MAH-PE 的近 20MPa。同样，MAH-DPE 相容剂对应的弯曲模量整体更高。如 CF242 样本，MAH-DPE 的弯曲模量接近 1.5GPa，高于 MAH-PE 的约 1.35GPa。。由此可见，MAH-DPE 对木塑复合材料的增强效果明显优于 MAH-PE。

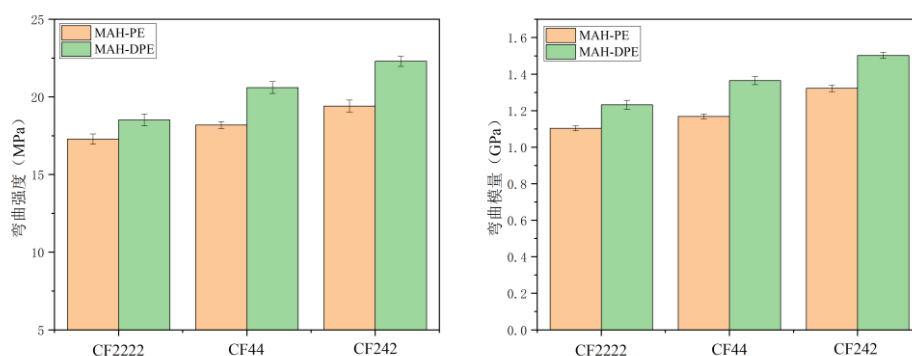


图 3-26 相容剂种类与长连续碳纤维木塑复合材料弯曲强度和弯曲模量的关系

这一现象的原因在于，长碳纤维增强木塑材料是通过模压成型的方式制备的。在这种成型工艺中，不存在物料与机器之间的过度摩擦，也不会出现纤维折断等不利于材料性能的现象。因此，材料的强度不会随着长碳纤维含量的上升而出现降低的趋势。

(2) LCF/WF/LDPE 木塑复合材料拉伸性能

图 3-27 呈现了长连续碳纤维在不同 MAPE 下对复合板拉伸性能的影响。从图中可以清晰地观察到，在 CF2222、CF44、CF242 三种样本中，MAH-DPE 相容剂对应的拉伸强度均高于 MAH-PE。例如 CF242 样本，MAH-DPE 下拉伸强度接近 40MPa，显著高于 MAH-PE 的约 35MPa。MAH-DPE 相容剂对应的拉伸模量整体更优。如 CF242 样本，MAH-DPE 的拉伸模量达 1.0GPa 左右，高于 MAH-PE 的约 0.9GPa，拉伸模量略微降低，但变化量不大。长碳纤维在复合材料中以连续分布的形态存在，这使得当复合板受到拉伸应力作用时，长碳纤维能够承担绝大部分的载荷。

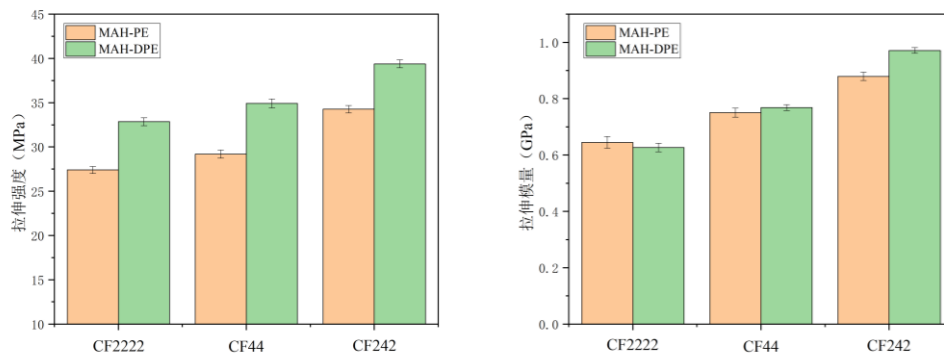


图 3-27 相容剂种类与长连续碳纤维木塑复合材料拉伸强度和拉伸模量的关系

(3) LCF/WF/LDPE 木塑复合材料冲击性能

图直观呈现了长碳纤维复合板中不同 MAPE 对复合材料冲击强度的显著影响，从中我们不难发现长碳纤维在增强木塑材料冲击强度方面功效卓著。在三种材料样本中，使用 MAH-DPE 相容剂的复合材料冲击强度均高于使用 MAH-PE 的情况。CF242 样本，MAH-DPE 对应的冲击强度约为 32MPa，而 MAH-PE 约为 28MPa，说明 MAH-DPE 在提高材料抵抗冲击破坏的能力上表现更好，是它改善了碳纤维与木塑基体之间的界面结合力，使材料在受到冲击时能更好地分散能量。

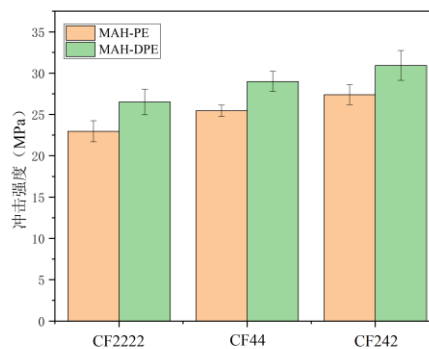


图 3-28 相容剂种类与长连续碳纤维木塑复合材料冲击强度的关系

长碳纤维的连续状态赋予了它出色的抗破坏能力。在冲击过程中，它如同坚韧的纽带，牢牢地维系着材料的结构完整性，不易出现拔出和断裂的状况。正因如此，在这种情形下，复合材料的破坏模式主要表现为树脂基体的变形。只有当外界施加的冲击力达到极其强大的程度，足以突破木塑板所能承受的极限，导致木塑板发生断裂时，整个复合材料才会迎来彻底的损坏。由此不难看出，长碳纤维在材料中的分布状态、排列方式等相关因素越是有利于其发挥性能优势，它对

木塑材料的保护力度就会越强，材料整体能够承受的冲击力也就越大，最终在冲击强度这一关键性能指标上得以显著提升。然而，长碳纤维的这些优势能够充分发挥，离不开相容剂这位幕后功臣的有力支持。相容剂就像是一位技艺高超的“调和师”，在长碳纤维与木塑材料之间搭建起了一座紧密沟通的桥梁。有了相容剂的助力，当复合材料再次遭受横向冲击载荷时，长碳纤维能够更为高效地将冲击力传递至整个复合材料体系之中。它促使材料的各个部分紧密协作，如同一个训练有素的团队，协同一致地抵御外力的侵袭，从而进一步提升了材料的冲击强度，使其在面对冲击时表现得更加坚韧和可靠。

3.4.3.3 LCF/WF/LDPE 木塑复合材料动态热机械性能分析

对比两种含不同相容剂的碳纤维增强木塑复合材料的储能模量，发现经 MAH-DPE 处理的材料，储能模量有所提升，这仍与之前静态力学性能结果相符。表明 MAH-DPE 使碳纤维与木塑树脂基体结合更优，整体改善了木塑复合材料的强度与刚度，这种差异在低温阶段显著，随着温度升高，储能模量差异逐渐减小，意味着 MAH-DPE 在低温时对复合材料刚度影响大，高温时影响较小^[11]。

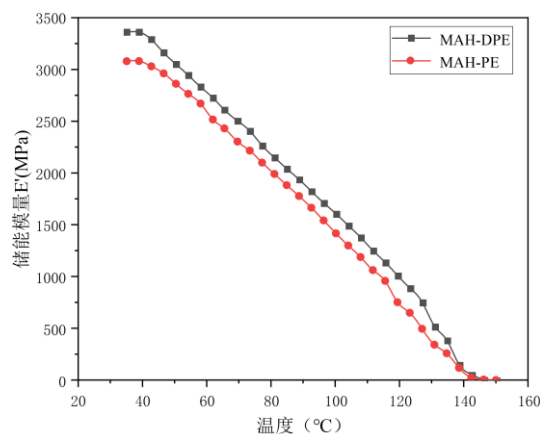


图 3-29 相容剂种类与短切碳纤维增强木塑复合材料的储能模量与温度的关系曲线

3.4.3.4 LCF/WF/LDPE 木塑复合材料蠕变性能分析

木塑复合材料的蠕变行为直接影响其化学性能。由于材料在低温下具有更高的刚度，因此木塑复合材料在低温下的抗蠕变性更大。通过短期弯曲蠕变试验研究了未改性和功能改性的热塑性木塑复合材料在一定温度范围内的蠕变行为，发现当温度升至室温以上时，木塑复合材料的蠕变程度随着温度的升高而增加，瞬时变形和蠕变速率均增加。

通过蠕变测试,发现 WPC 的弯曲蠕变在特点条件下产生了变形。使用蠕变测试数据,以小时为单位作为横坐标和蠕变变形变量作为纵坐标,使用软件绘制蠕变变形散点图。由于各组测试数据的蠕变图趋势基本一致,因此选择表所示得到的蠕变测试数据来绘制蠕变图,如图所示。在图中可以看出,随着蠕变时间的增加,蠕变逐渐增大,在恒载荷的初始阶段,蠕变变形急剧增大;在蠕变中期,蠕变变形迅速增加;随着时间的不断增加,蠕变缓慢增加;在随后的测试阶段的时间中,蠕变变量在两三个小时内没有增加,并且增加率几乎为零。

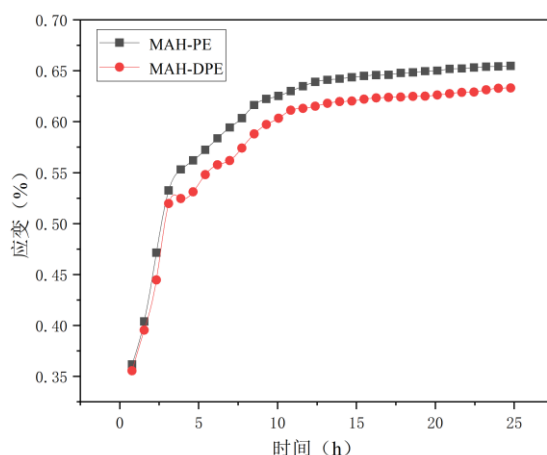


图 3-30 相容剂种类与长连续碳纤维增强木塑复合材料的蠕变曲线

3.4.3.5 LCF/WF/LDPE 木塑复合材料吸水率和厚度膨胀率分析

由图 3-31 可知,随着浸水时间的延长,MAH-DPE 和 MAH-PE 长连续碳纤维增强木塑复合材料的吸水率均上升,表明两者在纤维层存在吸水现象,而吸水性能是影响长连续碳纤维增强木塑复合材料吸水率最直接的因素。。然而,MAH-DPE 木塑复合材料的吸水率明显低于 MAH-PE。在浸水 168 小时后,MAH-PE 复合材料的吸水率达到 12.16%,而 MAH-DPE 的吸水率仅为 10.85%。

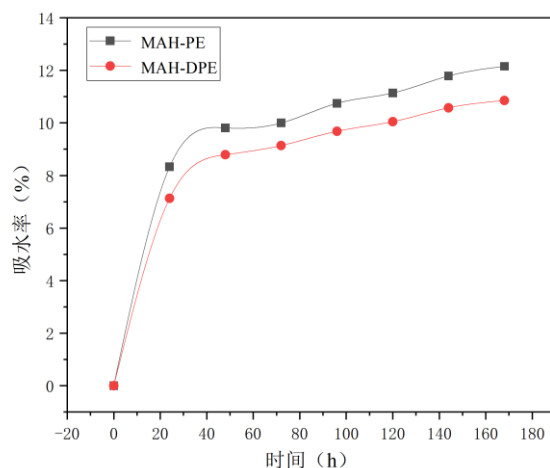


图 3-31 相容剂种类与长连续碳纤维增强木塑复合材料的吸水率曲线

从图中可以看出，两种复合材料在吸水后均未出现明显的厚度膨胀现象。然而，与 MAH-PE 相比，MAH-DPE 木塑复合材料的吸水厚度膨胀率更低。在浸水 168 小时后，MAH-PE 复合材料的吸水厚度膨胀率为 0.1%，而 MAH-DPE 复合材料的膨胀率仅为 0.09%。这一差异主要源于木粉的亲水性与塑料基体的疏水性之间的界面相容性较差，导致水分易于侵入。高接枝聚合物能够在木粉表面形成疏水层，不仅降低了木粉的吸水性，还增强了木粉与塑料基体之间的界面结合力，从而有效阻止水分在界面处的渗透，显著提升了复合材料的耐水性能。这一结果表明，提高接枝率是改善木塑复合材料耐水性能的有效途径。

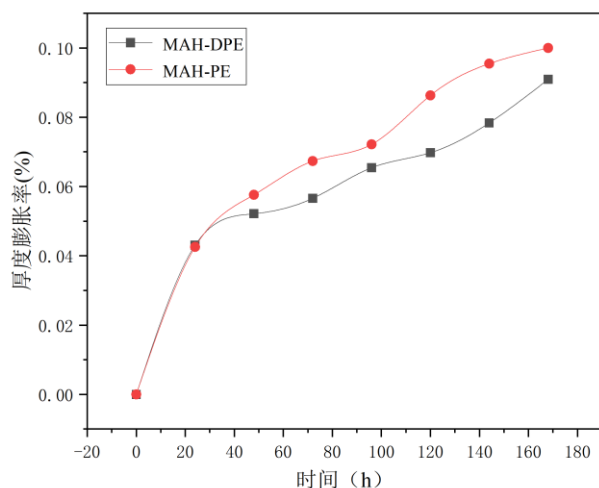


图 3-32 相容剂种类与长连续碳纤维增强木塑复合材料的厚度膨胀率曲线

3.5 本章小结

本章研究了低共熔溶剂体系的相容剂对木塑复合材料（WF/LDPE）、短切碳纤维增强木塑复合材料（SCF/WF/LDPE）和长连续碳纤维增强木塑复合材料（LCF/WF/LDPE）性能的影响，主要结论如下：

（1）MAH-DPE 相容剂凭借高接枝率，增强了木粉与塑料基体间的界面结合力，在拉伸、弯曲和冲击性能方面均有出色表现。拉伸强度提升约 6MPa，弯曲强度提升约 7MPa，冲击强度提升幅度达 10%-21%，有效改善了木塑复合材料的力学性能。

（2）SEM 观察到碳纤维与聚乙烯基体界面结合良好，主要受力形式为碳纤维拔出。红外光谱和 XRD 分析表明原材料与碳纤维共混成功，且材料结晶度增加，分子链排列更规则。随着短碳纤维质量分数的增加，复合材料的力学性能均有所变化，在某一含量达到最大值，再继续增加含量，会使性能下降。添加 MAH-DPE 后，材料拉伸强度提升约 26.08%，抗弯强度提升约 36%，冲击强度提升约 15%。动态热机械性能方面，碳纤维增强了复合材料的储能模量，MAH-DPE 在低温下对刚度影响更大；蠕变性能分析显示，碳纤维和 MAH-DPE 能抑制塑料分子链运动，减小蠕变；在耐水性能上，MAH-DPE 降低了复合材料的吸水率和厚度膨胀率，吸水 168h 后，吸水率从 5.84%降至 2.23%，厚度膨胀率从 0.1%降至 0.09%。

（3）长碳纤维的加入显著提升了复合材料的力学性能。添加 MAH-DPE 后，复合板弯曲强度从 19.59MPa 提升至 22.45MPa，弹性模量从 1.31GPa 提升至 1.5GPa；拉伸强度从 27.78MPa 提升至 33.03MPa，拉伸模量变化不大；冲击强度从 27.87MPa 提升至 38.84MPa。热机械性能、蠕变性能、吸水率和厚度膨胀率等方面的表现与 SCF/WF/LDPE 类似，进一步证明 MAH-DPE 能优化复合材料性能。

第4章 结论与展望

4.1 结论

本研究成功制备了基于低共熔溶剂体系的 MAH-DPE 相容剂,并将其应用于木塑复合材料及碳纤维增强木塑复合材料中,取得了以下成果:

采用物质的量比为 1:2 的氯化锌/乳酸(ZnCl_2/LA)低共熔溶剂对聚乙烯(PE)粒子进行预处理,成功制备出 MAH-DPE 相容剂。经处理后的 PE 粒子表面粗糙,含氧基团增加,极性增强,结晶度减小,MAH 接枝率提升 10%以上,为解决木塑复合材料中木纤维与塑料基体极性差异大、界面相容性差的问题提供了有效途径。

将 MAH-DPE 相容剂应用于木塑复合材料(WF/LDPE)、短切碳纤维增强木塑复合材料(SCF/WF/LDPE)和长连续碳纤维增强木塑复合材料(LCF/WF/LDPE),显著提升了材料的力学性能。在 WF/LDPE 中,拉伸、弯曲和冲击强度均提高;在 SCF/WF/LDPE 中,各项力学性能大幅提升,同时储能模量增强,蠕变减小,耐水性能改善;在 LCF/WF/LDPE 中,弯曲、拉伸和冲击强度显著提升,在其他性能方面也有良好表现。

本研究在相容剂制备方法上采用低共熔溶剂预处理 PE 基体,为提高相容剂接枝率和粘接强度提供新方法,且该方法绿色环保;同时系统研究了相容剂对不同纤维增强木塑复合材料多种性能的影响,揭示了其作用机制,为木塑复合材料的发展提供了新方向。

4.2 展望

在材料科学迅猛发展的当下,木塑复合材料的研究与应用前景广阔。本研究虽成功制备 MAH-DPE 相容剂并优化了木塑复合材料性能,但仍有诸多可探索之处。

在相容剂性能提升方面,可尝试不同低共熔溶剂体系或复合体系处理 PE 基体,进一步提高 MAH 接枝率与粘接强度,探索更多提升界面相容性的有效方法。同时,深入研究相容剂对木塑复合材料长期性能的影响,如耐老化性能等,以拓展其在户外等严苛环境中的应用。

对于碳纤维增强木塑复合材料，需优化碳纤维的分散工艺，使其在基体中分布更均匀，充分发挥增强效果。此外，结合等新兴成型技术，开发具有复杂结构和特殊功能的木塑复合材料制品，满足个性化、高端化的市场需求，推动木塑复合材料产业向更高层次发展，创造更大的经济与环境效益。

参考文献

- [1]李力. 短碳纤维增强聚乙烯树脂复合材料制备与性能研究[D]. 华东交通大学, 2011
- [2]杨玲. 离心铸造SiC颗粒增强铝基复合材料筒状零件的组织性能研究[D]. 重庆大学, 2008
- [3]张祺鑫. 连续碳纤维增强ABS及其合金[D]. 北京化工大学, 2012
- [4]Makradi A ,Zopp C ,Laachachi A , et al.Manufacturing, microstructural and mechanical investigations of inverse hybrid composite laminates: Glass fiber-reinforced polyamide-6/aluminium[J].Composite Structures, 2025, 3591: 19027-119027.
- [5]陈平, 陆春, 于祺, 孙明. 连续纤维增强PPESK树脂基复合材料的界面性能[J]. 材料研究学报, 2005, 16(2): 159-164
- [6]王绍权. 液氨浸渍对C/BMI复合材料性能的影响[D]. 哈尔滨工业大学, 2012
- [7]贾少栋. 基于复合材料产业分析研究[J]. 化学工程与装备, 2009, 32(3): 87-88
- [8]孙树民. 混凝土结构无损检测技术的发展[J]. 广东建材, 2003, 22(2): 30-32
- [9]Lu C,Chen P,Yu Q.Interfacial adhesion of plasma treated carbon fibre/poly(phthalazinone ether sulfone ketone)Composites[J].Journal of Applied Polymer Science,2007, 106: 1733-1741.
- [10]张庐陵. 竹纤维复合材料的组织设计、制备与性能研究[D]. 南京林业大学, 2009
- [11]李皓. 短碳纤维增强聚醚醚酮复合材料的制备及性能研究[D]. 天津大学, 2006
- [12]Kaybal B H ,Ulus H ,Cacik F , et al.Multi-Scale Mechanical Behavior of Liquid Elixir® Based Thermoplastic Matrix Composites Reinforced with Different Fiber Types: Insights from Fiber–Matrix Adhesion Interactions[J].Fibers and Polymers, 2024, 25(12): 1-16.
- [13]张思成, 盛冬发, 董春雷, 等. 秸塑复合材料蠕变性能分析[J]. 功能材料, 2020, 51(10): 10110-10115.
- [14]杨元强, 张凤波, 张振莉, 等. 聚烯烃木塑复合材料研究进展[J]. 化工新型材

- 料, 2023, 51(S1): 23-28,32.
- [15]蒋琨, 贺盛喜, 黄东. PVC木塑复合材料研究现状及发展趋势[J]. 聚氯乙烯, 2019, 47(2): 1-4.
- [16]孙亨博. 废旧塑料的回收处理[J]. 当代化工研究, 2017(11): 59-60.
- [17]邓梦龙. 废塑料回收利用前景[J]. 甘肃科技, 2020, 36(14): 22-25.
- [18]张蒙蒙, 宋强, 宋丽华, 等. 城市生活垃圾与松木屑共热解实验研究[J]. 环境工程, 2018, 36(4): 137-141.
- [19]王迪, 张胜, 谷晓昱, 等. EPS木塑复合材料的制备及阻燃改性[J]. 塑料, 2020, 49(2): 44-47.
- [20]唐海文. 木塑复合材料的生产要点和发展研究[J]. 中国建材科技, 2020, 29(4): 45-46, 54.
- [21]张泽华, 李雪菲, 张双保. 国内外木塑复合材料的研究进展[J]. 木材加工机械, 2018, 29(6): 36-38.
- [22]胡圣飞, 陈文, 陈华, 等. PVC/稻壳复合材料塑化性能与动态黏弹特性研究[J]. 塑料工业, 2010, 38(1): 63-65.
- [23]唐婷, 何栋. 植物纤维/PVC木塑复合材料制备及其性能分析[J]. 粘接, 2019, 40(8): 80-82.
- [24]段国燕, 何春霞, 王敏, 等. 三种木质纤维/PVC基木塑复合材料性能比较[J]. 产业科技创新, 2020, 2(4): 42-43.
- [25]冯泽旭, 宁莉萍, 逯新辉, 等. 两种增塑剂对废旧PVC基竹塑复合材料性能的影响[J]. 材料科学与工程学报, 2020, 38(1): 123-128.
- [26]余旺旺, 刘芹, 杨晨, 等. 不同塑料基木塑复合材料的性能对比研究[J]. 塑料工业, 2020, 48(6): 121-125.
- [27]张宁, 赵海宾, 高赞, 等. 车内饰品聚丙烯/陶瓷纤维复合材料的制备及表征[J]. 塑料科技, 2020, 48(11): 25-28.
- [28]张作才, 夏江奇, 李裕琪, 等. RA-g-PEPA超分散剂对PP/MCF木塑复合材料性能的影响[J]. 塑料科技, 2019, 47(7): 111-115.
- [29]王苏炜, 徐凌秀, 薛平, 等. 共混改性对PP基发泡木塑复合材料性能的影响[J]. 塑料工业, 2019, 47(10): 124-129.

- [30]关雅慧, 汪秀丽, 邓聪, 等. 基于次磷酸铝的聚丙烯木塑复合材料的阻燃改性研究[J]. 化学研究与应用, 2019, 31(1): 87-93.
- [31]徐博仁, 汪秀丽, 赵泽永, 等. 聚丙烯木塑复合材料的阻燃改性研究[J]. 塑料工业, 2020, 48(9): 38-40, 65.
- [32]郭丹, 陈屿恒, 廖增强, 等. 聚丙烯/秸秆粉木塑复合材料的辐射改性及其结构与性能研究[J]. 塑料科技, 2019, 47(5): 50-55.
- [33]张智渊. 聚乙烯管材管件的发展[J]. 山西化工, 2018, 38(1): 42-44.
- [34]郭红军. 聚乙烯基竹塑复合材料的制备及性能研究[J]. 塑料工业, 2019, 47(8): 43-46.
- [35]祁睿格, 何春霞, 付菁菁, 等. 无机纳米粒子对木粉/高密度聚乙烯木塑复合材料热学及力学性能的影响[J]. 上海交通大学学报, 2019, 53(3): 373-379.
- [36]孙会宁, 马家举. ABS透明塑料低表面能基材粘接优化设计[J]. 塑料, 2019, 48(3): 23-25, 41.
- [37]李伟浩, 刘超栋. ABS木塑复合材料的制备与研究[J]. 化工新型材料, 2016, 44(12): 129-131.
- [38]杨飞文, 龙海波, 董倩倩, 等. 松木粉/ABS木塑复合材料的制备与性能研究[J]. 塑料工业, 2019, 47(S1): 78-81.
- [39]董淑娟, 周根树. 木塑复合材料的研究与展望[J], 材料导报, 2009, 18(9): 61-64.
- [40]王清文, 王伟宏 等 编著. 木塑复合材料与制品[M]. 北京: 化学工业出版社, 2007.
- [41]赵雪峰, 白树林, 楚小瀛. 木塑复合材料的发展回顾[J]. 材料导报, 2004, 18(2): 52-55.
- [42]刘玉强, 赵志曼. 木塑复合材料及其发展[J] 化工新型材料, 2005, 33(3): 59-61.
- [43]Zhang Y, Zhang S Y, Yang D Q, et al. Dimensional stability of wood-polymer composites[J]. Journal of applied polymer science, 2006, 102(6): 5085-5094
- [44]Mohd Ishak ZA, Ariffin A, Senawi R. Effects of hygrothennal aging and a silane coupling agent on the tensile properties of injection molded short g

- lass fiber reinforced poly composites [J]. European Polymer Journal, 2001.37(8) : 1635-1647
- [45]Debnath S, Wunder SL, McCool JI, Baran GR. Silane treatment effects on glass/resin interfacial shear strengths[J]. Dent Mater, 2003, 19 (5): 441-448
- [46]Sanfilippo C ,Fiore V ,Calabrese L , et al.Impact of Surface Treatment on the Strengthening of Geopolymer Composites Reinforced with Short Sisal Fibers[J].JOM, 2024, 76(8): 4514-4525.
- [47]王君, 木塑复合材料的界面化学及材料性能研究[D]. 北京: 北京林业大学, 2007.
- [48]Anatole A.Klyosov. 木塑复合材料[M]. 王伟宏, 宋水明, 译. 北京: 科学出版社, 2010: 301-315
- [49]程然. PET纤维增强HDPE木塑复合材料的成型工艺与性能[D]. 东北林业大学, 2014.
- [50]王超, 何继敏. 木塑复合材料注射成型的研究进展[J]. 工程塑料应用, 2008, 36(6): 81-84.
- [51]江波, 许演华, 张金斌. 木塑复合材料成型技术装备的研究现状和发展方向[J]. 橡塑技术与装备, 2005 ,31(3): 4-13.
- [52]钱世准. 木纤维塑料复合材料及其应用[J]. 玻璃钢, 2002. 1: 40-42.
- [53]李坚, 许民. 生物质-塑料复合工学[M]. 北京: 科学出版社, 2006.
- [54]Rongxian Ou,Hui Zhao,, Qingwen Wang. Reinforcing effects of Kevlar fiber on the mechanical properties of wood-flour/high-density-polyethylene composites[J]. Composites:PartA, 2010, 41: 1272-1278.
- [55]钟鑫, 薛平, 丁筠. 木塑复合材料性能研究的关键问题[J]. 工程塑料应用, 2003, 31.
- [56]崔益华, 陶杰, 玻璃纤维/木塑混杂复合材料及其协同增强效应[J]. 高分子材料科学与工程, 2006, 22(3): 231-234.
- [57]许民, 高延明, 才智, 王文. 木树纤维与回收聚丙烯的热压复合工艺研究[J]. 林产工业, 2006, 33(3): 22.
- [58]黎先发, 罗学刚. 增容剂LDPE-g-MAH对木质素/聚乙烯吹塑薄膜形貌与性能

- 的影喘[J], 化工学报, 2005, 56(12): 2429-2433.
- [59]臧克峰, 项素云. MAH-g-PP及偶联剂处理木粉填充PP的研究[J]. 中国塑料, 2001, 15(2): 71-73.
- [60]吴清鹤, 李永鸿, 孔萍等. 增容剂对再生聚丙烯/木粉复合材料性能的影响[J]. 工程塑料应用, 2007, 35(1): 26-29.
- [61]张克宏, 肖慧, 界面改性剂对PE基木塑复合材料性能的影响[J]. 塑料工业, 2012, 40(10): 58-61.
- [62]刘文鹏, 李炳海. 不同相容剂对PP/木粉复合材料力学性能的影响[J]. 塑料, 2006, 34(5): 21-24.
- [63]黄铠盛, 陈国华. 相容剂改性竹粉基木塑复合材料[J], 塑料, 2012, 41(5): 83-85.
- [64]Khaledi B ,Ebrahimi G N .Structural analysis of poly(ethylene terephthalate) modified by polypropylene-graft-maleic anhydride from rheological data[J]. Journal of Applied Polymer Science, 2019, 136(1): n/a-n/a.
- [65]Morales-Wiemer E ,Macossay J ,Bucio E .Radiation grafting of N,N'-dimethylacrylamide and 2-hydroxyethylmethacrylate onto polypropylene films by one step method[J].Radiation Physics and Chemistry,2013, 84: 166-169.
- [66]FihriA ,LazkoJ ,LaoutidF , et al.Effect of interfacial modification on functional properties of polyethylene and polypropylene—Fibrous silica nanocomposites[J].Journal of Vinyl and Additive Technology, 2023, 30(3): 653-662.
- [67]徐焕翔, 何慧 ,洪浩群等. 多单体固相接枝共聚物对废聚丙烯/稻糠复合体系结构与性能的影响[J]. 塑料工业, 2005, 33(5): 49-52.
- [68]刘柳, 夏英, 唐乃岭等. 增容剂对废旧PS/PE-HD/废旧ABS/木粉复合材料性能的影响[J]. 中国塑料, 2006, 20(12): 77-81.
- [69]林松柏, 肖聪明, 吴宏等. 聚乙烯接枝马来酸酐/聚氯乙烯共混体系的研究[J]. 中国塑料, 2003, 17(8): 28-31.
- [70]Chen C, Liu W, Yang H, et al. Synthesis of solid-solid phase change material for thermal energy storage by crosslinking of polyethylene glycol with poly (glycidyl methacrylate)[J]. Solar Energy, 2011, 85(11): 2679-2685.
- [71]Tan L, Deng J, Yang W. A facile approach to surface graft vinyl acetate o

- onto polyolefin articles. *Polymers for Advanced Technologies*, 2004, 15(9): 523-527.
- [72]王鉴, 王绪文, 李安莲, 等. 聚丙烯化学改性方法[J]. 现代塑料加工应用, 2010, 22(06): 55-59.
- [73]刘俊龙, 刘克勇, 王少延. 线性低密度聚乙烯同相接枝丙烯酸丁酯的研究[J], 塑料科技, 2009, 37(3): 36-39
- [74]张爽, 冯钠, 马春等. 聚丙烯固相接枝马来酸酐的研究[J]. 塑料科技, 2005, 6: 1-4
- [75]张乐天, 范志强, 徐君庭. 主链结构对聚丙烯球形粒子中苯乙烯固相接枝来合的影响[J], 石油化工, 2004, 33(2): 131-135.
- [76]张艳中, 范志强, 封麟先. 球形聚丙烯粒子固相接枝聚乙烯的研究[J], 高分子学报, 2002. 4: 432-437
- [77]Liu T, Hu G Li, Tong G et al. Supercritical carbon dioxide assisted solid-state grafting process of maleic anhydride onto polypropylene[J]. *Industrial & engineering chemistry research*, 2005, 44(12):4292-4299.
- [78]Huang H, Zhu C Y, Zhou Z F, et al. Melt grafting of a long-chain unsaturated carboxylic acid onto polypropylene[J]. *Reactive and Functional Polymers*, 2002, 50(1): 49-55.
- [79]Pesneau I, Champagne M F, Huneault M A. Glycidyl methacrylate grafted linear low density polyethylene fabrication and application for polyester/polyethylene bonding[J], *Journal of applied polymer science*, 2004, 91(5): 3180-3191.
- [80]李超勤, 张勇, 黄风华. MAH熔融接枝LDPE及其产物在PC/HDPE共混物中的应川研究[J], 中国塑料, 2002,16(8): 31-34.
- [81]王丽珠. 聚烯烃接枝马来酸酐增容增韧尼龙66的研究[D], 大连: 大连理工大学, 2007.
- [82]姚占海, 殷敬华. LLDPE/LLDPE-g-AA共混物的接触角入红外光谱表征[J], 工程塑料应用, 2001, 29(8): 33-35.
- [83]解林坤, 叶喜, 吴章康, 等. 低温等离子体对低密度聚乙烯(LDPE)薄膜表面改性

- 的研究[J].材料研究学报,2010,24(06):661-666.
- [84]张涛,侯小东,曹阿民.辐射接枝共聚合反应及其在有机生物医用材料制备中的应用[J].有机化学,2006,(09):1328-1334.
- [85]王浩.聚合物溶液接枝反应研究进展[J].石油化工技术与经济,2019,35(01):51-55.
- [86]He X ,Zheng S ,Huang G , et al.Solution Grafting of Maleic Anhydride on Low-Density Polyethylene: Effect on Crystallization Behavior[J].Journal of Macromolecular Science, Part B, 2013, 52(9): 1265-1282.
- [87]李海虹, 杨党林. LLDPE与甲基丙烯酸接枝共聚[J], 合成树脂及塑料, 2002, 19(1) :10-13.
- [88]王迪,韩义,吴广峰,等.线型低密度聚乙烯溶液接枝聚甲基丙烯酸甲酯[J].塑料工业,2015,43(01):35-38.
- [89]Yan J, Miao X, Cui X, et al. Process of grafting styrene onto LLDPE by swelling and suspension copolymerization[J]. Polymer Engineering & Science, 2010, 50(9): 1713-1720.
- [90]Lu B, Chung T C. Synthesis of maleic anhydride grafted polyethylene and polypropylene, with controlled molecular structures[J]. Journal of Polymer Science Part A: Polymer Chemistry, 2000, 38(8): 1337-1343
- [91]郭润德, 童筱莉, 杨正龙. 悬浮法合成聚丙烯接枝丙烯酸[J]. 功能高分子学报, 2001 14(D): 85-89.
- [92]熊琼, 何培新. 氯化聚乙烯溶胀悬浮接枝甲基丙烯酸- β -羟乙酯[J]. 高分子材料科学与工程, 2010(1): 36-39.
- [93]王浩. 聚合物溶液接枝反应研究进展[J].石油化工技术与经济, 2019, 35(01): 51-55.
- [94]王正洲, 刘晓峰, 胡淼. 马来酸酐悬浮固相接枝聚丙烯[J]. 合成树脂及塑料, 2006, 23(2): 32-35.
- [95]孔维峰, 魏无际, 刘卫东. 悬浮法聚乙烯接枝马来酸酐反应的影响因素[J], 现代塑料加工应用, 2008, 20(2):24-27
- [96]吕兰香. 多孔聚乙烯水悬浮接枝聚合及其性能研究[D]. 北京化工大学硕士学

位论文: 北京化工大学, 2012

- [97]张巧云. 悬浮聚合中线性低密度聚乙烯增韧聚苯乙烯粒子的制备研究[D], 吉林大学硕士学位论文: 吉林大学, 2011
- [98]王超, 何继敏.木塑复合材料注射成型的研究进展[J], 工程塑料应用, 2008, 36(6): 81-84.
- [99]Tutunchi A ,Ghodrati T ,Tabrizi T A , et al.Enhancing the mechanical properties of CF-reinforced epoxy composites through chemically surface modification of carbon fibers via novel two-step approach by addition of epichlorohydrin[J].Functional Composites and Structures, 2024, 6(3): 035005-035005.
- [100]Pat S ,Tanışlı M ,Bakır M , et al.Mechanical and adhesive properties of graphene-coated thermoset and thermoplastic aircraft composite materials by physical vapor deposition technology[J].International Journal of Adhesion and Adhesives ,2025, 139: 103971-103971.
- [101]Valentina B ,Roberto S .New Light in Polymer Science: Photoinduced Reversible Addition-Fragmentation Chain Transfer Polymerization (PET-RAFT) as Innovative Strategy for the Synthesis of Advanced Materials[J].Polymers, 2021, 13(7): 1119-1119.
- [102]上官倩苒, 蔡泖华. 碳纤维及其复合材料的发展及应用[J].上海师范大学学报(自然科学版), 2008, 37(3): 275-279
- [103]唐见茂. 碳纤维树脂基复合材料发展现状及前景展望[J], 航天器环境工程, 2010, 27(3): 269-280
- [104]Vautard F, Ozcan S.Paulauskas F, et al.Influence of the carbon fiber surface microstructure on the surface chemistry generated by a thermo-chemical surface treatment[J]. Applied Surface Science, 2012, 261:473-480
- [105]Eddine S S ,Fodil M ,George C , et al.Experimental and multi-scale investigation of the mechanical behavior of mechanically recycled glass fiber reinforced thermoplastic composites[J].Composites Part B, 2023, 264
- [106]Rosso Patrick, Friedrich Klaus, et al. A novel polyamide 12 polymerization system and its use for a LCM-process to produce CFRP[J]. Journal of Thermoplastic Composite Materials, 2005, 18(1): 77-90

- [107]李鹏. 碳纤维/乙烯基酯树脂拉挤复合材料的制备及应用研究[D]北京: 北京化工大学, 2005
- [108]高鑫, 宋艳江, 王晓东, 黄培. 复合处理碳纤维增强聚酰亚胺复合材料力学性能[J], 复合材料学报, 2009, 26(3): 50-54
- [109]Deak T, Czigany T. Chemical composition and mechanical properties of basalt and glass fibers: A comparison[J]. Textile Research Journal, 2009. 79 (7) :645-651.
- [110]Zhou Z F, Xu M, Yang Z, et al. Effect of maleic anhydride grafted polyethylene on the properties of chopped carbon fiber/wood plastic composites [J]. Reinforced Plastics and Composites, 2014. 33(13): 1216-1225.
- [111]杜凤, 王伟宏. 碳纤维增强木粉/聚乙烯复合材料的制备及其力学性能[J]. 南京林业大学学报: 自然科学版. 2015, 39(2): 132-136.
- [112]Fu S, Song P, Yang H, et al. Effects of carbon nanotubes and its functionalization on the thermal and flammability properties of polypropylene/wood flour composites[J]. Journal of Materials Science, 2010, 45(13): 3520-3528.
- [113]Kordkheili H Y, Farsi M, Rezazadeh Z. Physical, mechanical and morphological properties of polymer composites manufactured from carbon nanotubes and wood flour[J]. Composites Part B: Engineering, 2013. 44(1): 750-755.

攻读学位期间主要成果

发表的论文

孟瑞杰, 陈福涛, 孙懿, 等. 低共熔溶剂预处理对聚乙烯及其与马来酸酐接枝率的影响[J]. 安徽工程大学学报, 文章编号: CN34-1318/ISSN2095-0977. (已录用)

申请的专利

孟瑞杰 王宗乾 左如忠 孙懿 陈福涛 王君 唐达磊 杨扬. 一种高接枝率木塑相容剂的制备方法. (申请号: 202410466995.4, 实质审查阶段)

获得的奖项荣誉

2022 年, 安徽工程大学二等学业奖学金

2023 年获得第十届“挑战杯·华安证券”安徽省大学生课外学术科技作品竞赛一等奖 (本人排名第三)

2024 年, 获得第十届安徽省“互联网+”大学生创新创业大赛暨中国国际“互联网+”大学生创新创业大赛铜奖 (本人排名第三)

2024 年, 安徽工程大学二等学业奖学金

致 谢

这三年时光既漫长又短暂，我的研究生生涯已接近尾声，期间充满了酸甜苦辣，也伴随着收获与成长。

首先，感谢我的导师左如忠教授。左老师为人谦和，平易近人。在我的研究生阶段，无论是在学习上、工作上还是生活上，左老师都让我感受到孜孜的教诲、精心的培养和悉心的关怀。另外，我还要由衷感谢王宗乾老师，本篇论文是在他的亲切关怀和悉心指导下完成的。从论文的选题、开题、撰写到最后的定稿，王宗乾老师始终都是耐心的指导，并不懈的支持。在这过程中王老师不仅使我树立了自己的学术目标、掌握了基本的研究方法，还使我明白了许多为人处世的道理。在此，谨向左老师和王老师表示崇高的敬意与由衷的感谢！

非常感谢孙懿老师在我研究生阶段对我的悉心帮助，感谢她在我的课题研究方向，研究思路中提出的宝贵的指导意见，使我在科研道路上少走了很多弯路！

感谢课题组的老师和同学们，多亏大家对我的帮助和指点，才使我能够顺利完成很多实验研究，感谢室友薛汪洋、雷俊伟对我学习和生活的帮助！

还要感谢多年来一直给予我充分的理解和支持的父母，感谢他们一如既往的鼓励和无微不至的关爱！

最后感谢安徽工程大学为我提供了舒适的学习和生活环境，让我在这里能够安心的完成学业！