玻纤增强回用聚丙烯复合材料的制备与性能研究

温浩宇，吴波，周敏，周易
（四川宜宾普拉斯包装材料有限公司，四川　宜宾　644007）

摘要：本文以回收聚丙烯（PP）为基体，通过添加不同比例的玻璃纤维（GF）、增韧剂及相容剂等助剂，系统研究了玻纤增强回用 PP 复合材料的力学性能和热性能变化规律。实验采用熔融共混法制备复合材料，重点考察了弹性体增韧剂、KT-1D/CMG9801/CMG5701 等相容剂体系以及晶须填料对复合材料拉伸强度、弯曲性能、冲击性能和结晶行为的影响。结果表明，添加 30% 玻璃纤维可显著提高回用 PP 的刚性，配合 5% CMG9801 相容剂和 0.2% 深圳成核剂时，复合材料拉伸强度达到 82.48 MPa，弯曲模量高达 6632.51 MPa；弹性体的加入可有效改善材料韧性，但过量添加会降低刚性。DSC 分析表明，深圳成核剂显著提升了回用 PP 的结晶温度（从 110.5 ℃升至 132.5 ℃）和结晶度（从 37.9% 提升至 53.1%），高结晶度是复合材料高刚性的微观结构基础。本研究为回用 PP 的高值化利用提供了重要的配方设计依据和技术参考。

关键词：回收聚丙烯；玻璃纤维；增韧改性；差示扫描量热法；高值化利用
引用论文：温浩宇，吴波，周敏，等．玻纤增强回用聚丙烯复合材料的制备与性能研究 [J]. 橡塑技术与装备，2026, 52(11):50-53.
中图分类号：TQ330.46　　**文章编号**：1009-797X(2026)11-0050-05
文献标识码：B　　DOI:10.13520/j.cnki.rpte.2026.11.010

0　引言

0.1　研究背景与意义

聚丙烯（Polypropylene, PP）作为五大通用塑料之一，因其密度低、化学稳定性好、加工性能优良、成本低廉等特点，广泛应用于汽车内饰、家用电器、包装材料、建筑管材等领域。据统计，全球 PP 年产量已超过 8 000 万 t，其中我国占比超过 30%。随着 PP 制品消费量的持续增长，废旧 PP 的产生量也急剧增加，由此带来的 " 白色污染 " 和资源浪费问题日益严峻 [1]。

废旧 PP 的回收利用主要有物理回收和化学回收两种途径。物理回收即通过粉碎、清洗、熔融再造粒等方式将废旧 PP 重新加工成制品，该方法成本低、工艺简单，是目前主流的回收方式。然而，回用 PP 在回收过程中经历了多次热历史，分子链发生断裂降解，导致其分子量降低、分子量分布变宽，力学性能尤其是冲击韧性和长期服役性能显著下降 [2]。直接将回用 PP 用于注塑成型，制品往往存在强度不足、脆性大、尺寸稳定性差等问题，难以满足高端应用需求，只能降级用于低端产品，经济价值有限 [3]。

玻璃纤维（Glass Fiber, GF）增强是提升 PP 力学性能最有效的手段之一。玻璃纤维具有高强度、高模量、耐热性好、价格低廉等优势，与 PP 复合后可形成有效的承载网络，显著提高材料的刚性、强度和尺寸稳定性。将玻纤增强技术与回用 PP 相结合，开发高性能玻纤增强回用 PP 复合材料，是实现废旧 PP 高值化利用的重要技术路径，对于推动塑料循环经济发展、降低碳排放具有重要的现实意义。

0.2　研究目的与内容

本研究以回收 PP 粉碎料为基体，通过添加 30% 玻璃纤维，配合不同种类的增韧剂、相容剂和成核剂，系统研究各组分对复合材料力学性能和热性能的影响规律，旨在开发综合性能优异的玻纤增强回用 PP 复合材料，为废旧 PP 的高值化利用提供技术支撑。主要研究内容包括：

（1）弹性体用量对回用 PP/ 玻纤复合材料性能的影响；

（2）弹性体增韧剂与长玻纤 / 短玻纤的协同效应；

（3）不同相容剂（KT−1D、CMG9801、CMG57

作者简介：温浩宇（1985−），男，硕士研究生，高分子材料研究所副主任工程师，主要从事高分子材料的功能改性与高分子材料的成型加工。

01）与成核剂（NA−50、深圳成核剂）的复配效果；

（4）晶须填料对复合材料性能的增强作用；

（5）DSC 热分析揭示结晶行为与宏观性能的关联机制[4]。

1 实验部分

1.1 实验原料

回收 PP 粉碎料：来源于废旧注塑制品，经清洗、破碎、造粒后使用；玻璃纤维：无碱短切玻纤和长玻纤，表面经硅烷偶联剂处理；弹性体（Vistamaxx）：丙烯基聚烯烃弹性体，埃克森美孚公司；弹性体：乙烯−辛烯共聚物弹性体；相容剂：KT−1D、CMG9801、CMG5701，均为马来酸酐接枝聚丙烯类相容剂；成核剂：NA−50（芳酰胺类）、深圳成核剂（磷酸酯类）；晶须：硫酸钙晶须或碳酸钙晶须；其他助剂：抗氧剂、润滑剂等。

1.2 样品制备

将回收 PP 粉碎料与各种助剂按配方比例在高速混合机中预混 3~5 min，使各组分均匀分散。将混合料加入双螺杆挤出机中进行熔融共混挤出，挤出温度设定为 180~220 ℃，螺杆转速为 200~300 rpm。挤出料条经水冷、切粒后得到玻纤增强回用 PP 粒料。粒料在 80 ℃下干燥 4 h 后，用注塑机注塑成标准力学性能测试样条，注塑温度为 200~230 ℃，模具温度为 40~60 ℃。

1.3 性能测试

力学性能：拉伸性能按 GB/T 1040.2 标准，在万能材料试验机上测试，拉伸速度 50 mm/min；弯曲性能按 GB/T 9341 标准，三点弯曲法，跨距 64 mm，加载速度 2 mm/min；冲击性能按 GB/T 1843 标准，悬臂梁缺口冲击试验。

热性能：采用差示扫描量热仪（DSC，TA Q2000）测试，氮气气氛 50 mL/min，升温速率 10 ℃/min，温度范围 40~220 ℃。程序：以 10 ℃/min 从 40 ℃升温至 220 ℃，恒温 3 min 消除热历史；以 10 ℃/min 降温至 40 ℃；再以 10 ℃/min 二次升温至 220 ℃。通过软件分析得到熔融温度（T_m）、结晶温度（T_c）、熔融焓（ΔH_m）、结晶焓（ΔH_c）及结晶度（X_c）。

结晶度计算公式：

$$X_c=\frac{\Delta H_m}{\Delta H^0{}_m\times(1-w_f)}\times 100\%$$

式中：ΔH_m 为样品熔融焓（J/g）；$\Delta H^0{}_m$ 为纯 PP 理论熔融焓（207 J/g）；w_f 为填料（玻纤 + 晶须）质量分数[5]。

2 结果与讨论

2.1 弹性体对短玻纤增强回用 PP 性能的影响

固定玻纤含量 30%、相容剂 4%，改变弹性体用量，结果见表 1。

表 1 弹性体用量对 PP/GF 复合材料性能的影响

配方	拉伸强度 /MPa	断裂伸长率 /%	弯曲模量 /MPa	冲击强度 /(kJ·m^{-2})
PP 67%/GF 30%/ 弹性体 3%	51.33	9.0	3 286.70	6.37
PP 65%/GF 30%/ 弹性体 5%	59.28	12.5	3 192.53	7.24
PP 60%/GF 30%/ 弹性体 10%	55.98	13.9	2 805.71	8.55
PP 55%/GF 30%/ 弹性体 15%	51.59	14.3	2 497.29	9.75

不添加弹性体时拉伸强度为 51.33 MPa。弹性体用量从 3% 增至 5% 时，强度提升至 59.28 MPa，增幅 15.5%，这是因为适量弹性体改善了 PP 与玻纤的界面润湿性，促进玻纤分散。继续增加至 10% 和 15%，强度逐渐下降，符合弹性体稀释刚性组分的一般规律。断裂伸长率和冲击强度随弹性体用量增加而单调上升，冲击强度从 6.37 kJ/m² 增至 9.75 kJ/m²，增幅超 50%。弯曲模量从 3 286.70 MPa 降至 2 497.29 MPa，降幅 24%。实际应用需根据刚性和韧性要求平衡用量。

2.2 弹性体与不同形态玻纤的协同效应[6~7]

比较短玻纤与长玻纤增强效果，结果见表 2。

表 2 弹性体增韧剂与短玻纤 / 长玻纤复合材料的性能对比

配方	拉伸强度 /MPa	断裂伸长率 /%	弯曲模量 /MPa	冲击强度 /(kJ·m^{-2})
PP 65%/ 短纤 30%/ 弹性体 5%	44.43	7.9	3 043.92	4.59
PP 60%/ 长纤两根 / 弹性体 10%	41.32	20.3	1 756.44	6.45
纯 PP/ 长纤一根	—	—	1 301.28	—
纯 PP/ 长纤两根	32.50	27.1	1 912.64	3.02

短玻纤体系拉伸强度（44.43 MPa）高于长玻纤（41.32 MPa），但断裂伸长率（7.90%）远低于长玻纤（20.32%）。短玻纤分散均匀，应力传递效率高；长玻纤保留更大长径比，通过纤维拔出、桥联机制吸收能量，韧性更好。长玻纤弯曲模量（1 756.44 MPa）显著低于短玻纤（3 043.92 MPa）。纯 PP/ 长纤对比表明，足量玻纤含量是保证高强度的前提[8]。长玻纤体系冲击强度（6.45 kJ/m²）优于短玻纤（4.59 kJ/m²）。

2.3 长玻纤增强体系中弹性体用量的优化

固定长纤三根，研究弹性体用量影响，结果见表 3。

表 3 长玻纤增强 PP/ 弹性体体系的性能

配方	拉伸强度 /MPa	断裂伸长率 /%	弯曲模量 /MPa	冲击强度 /(kJ·m^{-2})
纯 PP+ 长纤三根	36.98	24.17	2 579.91	3.12
PP+3% 弹性体 + 长纤三根	36.33	22.34	2 779.38	3.91
PP+5% 弹性体 + 长纤三根	35.14	19.80	2 813.43	3.84
PP+8% 弹性体 + 长纤三根	33.73	16.53	2 830.94	4.26
PP+10% 弹性体 + 长纤三根	32.71	17.71	2 644.57	4.51

随弹性体用量增加，拉伸强度和断裂伸长率均下降，与短玻纤体系不同。弯曲模量在 8% 时达最大值 2830.94 MPa，可能与界面粘结改善有关，10% 时下降。冲击强度从 3.12 kJ/m² 增至 4.51 kJ/m²，增幅约 45%。长玻纤体系中弹性体适宜用量为 3%~5%，此时弯曲模量较高（2 779~2 813 MPa），冲击强度改善（3.84~3.91 kJ/m²），拉伸强度损失较小[9]。

2.4 相容剂与成核剂复配体系的高性能化设计

引入三种相容剂与两种成核剂复配，添加 5% 晶须和 30% 玻纤，结果见表 4。

表 4 不同相容剂 / 成核剂体系的力学性能

配方	拉伸强度 /MPa	断裂伸长率 /%	弯曲模量 /MPa	冲击强度 /(kJ·m^{-2})
KT−1D/NA−50	73.93	13.6	4 980.86	8.49
CMG9801/NA−50	75.97	12.8	5 185.28	8.08
CMG5701/NA−50	74.55	12.5	5 227.59	8.29
KT−1D/ 深圳成核剂	79.56	10.4	6 271.22	7.36
CMG9801/ 深圳成核剂	82.48	11.1	6 632.51	7.84
CMG5701/ 深圳成核剂	87.19	12.3	6 467.83	8.69
KT−1D/ 弹性体 10%	64.49	11.7	4 624.34	9.23

深圳成核剂体系全面优于 NA−50 体系。以 CMG9801 为例，深圳体系拉伸强度（82.48 MPa）比 NA−50（75.97 MPa）高 8.6%，弯曲模量（6 632.51 MPa）高 27.9%，表明磷酸酯类成核剂成核效率更高。相容剂种类影响显著，深圳体系中 CMG5701 拉伸强度最高（87.19 MPa），NA−50 体系中 CMG9801 最佳（75.97 MPa），说明相容剂与成核剂存在协同效应[10~11]。冲击性能与刚性呈 trade−off 关系，深圳体系冲击强度（7.36~8.69 kJ/m²）略低于 NA−50（8.08~8.49 kJ/m²），但 CMG5701/ 深圳体系实现了较好平衡。KT−1D/10% 弹性体体系冲击强度最高（9.23 kJ/m²），但刚性明显降低。

2.5 DSC 热性能分析

为揭示微观结构机制，对典型样品进行 DSC 测试，结果见表 5。

表 5 不同配方复合材料的 DSC 热性能参数

配方	T_m/℃	T_c/℃	ΔH_m/J·g^{-1}	X_c/%
纯回用 PP	162.3	110.5	78.5	37.9
回用 PP/30% 玻纤	163.1	118.2	62.4	43.2
回用 PP/30% 玻纤 /CMG9801	165.2	123.4	66.3	45.9
回用 PP/30% 玻纤 /CMG9801/NA−50	166.8	128.7	71.5	49.5
回用 PP/30% 玻纤 /CMG9801/ 深圳成核剂	168.4	132.5	76.8	53.1
回用 PP/30% 玻纤 /CMG9801/ 深圳 /5% 晶须	167.9	131.8	75.2	55.8

纯回用 PP 结晶度仅 37.9%，远低于原生 PP（约 50~60%），是力学性能劣化的根本原因。添加 30% 玻纤后，X_c 提升至 43.2%，玻纤起到异相成核作用。CMG9801 将 X_c 提升至 45.9%，界面改善使成核效果

更充分。深圳成核剂效果最显著，X_c 达 53.1%，接近原生 PP 水平，直接解释了该体系高弯曲模量（6 632.51 MPa）的微观机制——高结晶度意味着更多 PP 分子链参与形成刚性晶区 [12]。

深圳成核剂 T_c 达 132.5 ℃，比纯回用 PP（110.5 ℃）提升 22 ℃，过冷度从 51.8 ℃降至 35.9 ℃，结晶速率大幅提升，有利于缩短注塑冷却时间，提高生产效率。添加 5% 晶须后 X_c 进一步提升至 55.8%，晶须兼具增强和异相成核双重功能，但过高结晶度可能导致晶区脆性增加，与冲击强度略降现象一致 [13~14]。

表 6 弹性体用量对结晶行为的影响（CMG9801/ 深圳成核剂体系）

弹性体用量 /%	T_m/℃	T_c/℃	X_c/%
0	168.4	132.5	53.1
3	167.6	131.2	51.8
5	166.8	129.8	50.2
8	165.5	127.4	48.6
10	164.2	125.1	46.3

随弹性体用量增加，T_m、T_c 和 X_c 均单调下降。弹性体插入 PP 晶区之间，破坏晶区连续性，是增韧的本质机制。但 5% 弹性体时 X_c 仍保持 50.2%，在成核剂 – 相容剂协同作用下，实现了“增韧不显著降强”，与力学性能数据相互印证。

3.6 各因素对性能影响的综合分析

（1）玻纤含量与形态：30% 玻纤是保证高强度的基础，短玻纤分散均匀、刚性贡献大，长玻纤保留长度、韧性贡献大。

（2）增韧剂类型与用量：弹性体与 PP 相容性好，短玻纤体系中 5% 用量可同时改善强度和韧性；长玻纤体系中 3%~5% 为宜。

（3）相容剂与成核剂协同：CMG9801/CMG5701 与深圳成核剂复配效果最佳，拉伸强度突破 80 MPa，弯曲模量超 6 000 MPa，达工程塑料水平。

（4）晶须增强：5% 晶须进一步提升刚性，可能与其纤维状结构、高模量及异相成核作用有关。

（5）结晶行为机制：DSC 揭示了宏观性能的微观本质——深圳成核剂通过提高结晶度和完善晶体结构实现增强；弹性体通过破坏晶区连续性实现增韧，两者需平衡调控。

3 结论

（1）以回收 PP 为基体，添加 30% 玻璃纤维、5% 相容剂和适量成核剂，可制备综合性能优异的增强复合材料，实现废旧 PP 高值化利用。

（2）弹性体在短玻纤体系中具有增韧增强双重效果，最佳用量 5%；在长玻纤体系中主要改善冲击韧性，最佳用量 3%~5%。

（3）相容剂与成核剂复配产生显著协同增强效应。CMG9801 与深圳成核剂复配时，拉伸强度达 82.48 MPa，弯曲模量达 6 632.51 MPa；CMG5701 与深圳成核剂复配时，拉伸强度可达 87.19 MPa。

（4）晶须填料可进一步提升刚性，5% 晶须与 30% 玻纤、5% 相容剂、0.2% 成核剂配合是优选配方。

（5）DSC 热分析表明，深圳成核剂显著提升回用 PP 结晶温度（从 110.5 ℃升至 132.5 ℃）和结晶度（从 37.9% 提升至 53.1%），高结晶度是高刚性的微观结构基础。最优配方结晶度达 55.8%，超过原生 PP 水平。

（6）本研究开发的玻纤增强回用 PP 复合材料，性能指标达到或接近纯 PP 增强水平，可替代部分原生塑料用于汽车零部件、电器外壳、工具手柄等领域，具有良好的经济效益和环境效益。

参考文献：

[1] 王琪，郭少云，李光宪 . 聚合物成型加工基础 [M]. 北京：化学工业出版社，2011.
[2] 杨鸣波，唐志玉 . 工程塑料改性技术 [M]. 北京：化学工业出版社，2008.
[3] 何曼君，陈维孝，董西侠 . 高分子物理 [M]. 上海：复旦大学出版社，2007.
[4] 李杰，郑强，杨桂生 . 聚丙烯 / 玻璃纤维复合材料界面改性的研究进展 [J]. 塑料工业，2019,47(5):1-6.
[5] 陈宇，王贵恒 . 废旧聚丙烯的回收与再利用技术进展 [J]. 工程塑料应用，2020,48(3):134-138.
[6] 黄年华，罗忠富，冯嘉春 . 马来酸酐接枝聚丙烯对 PP/GF 复合材料性能的影响 [J]. 高分子材料科学与工程，2018,34(7):78-83.
[7] 刘佑习，李毕忠 . 聚丙烯成核剂的研究进展 [J]. 塑料工业，2018,46(3):1-6.
[8] 李迎春，郭宝春，贾德民 . 晶须增强聚合物复合材料的研究进展 [J]. 材料导报，2017,31(5):56-62.
[9] Fu S Y, Feng X Q, Lauke B, et al. Effects of particle size, particle/matrix interface adhesion and particle loading on mechanical properties of particulate-polymer composites[J]. Composites Part B: Engineering,2008,39(6):933-961.
[10] Thomason J L. The influence of fibre length and concentration on the properties of glass fibre reinforced polypropylene: 5. Injection moulded long and short fibre PP[J]. Composites Part A, 2002, 33(12):1641-1652.
[11] Lorenzo A T, Arnal M L, Albuerne J, et al. DSC isothermal polymer crystallization kinetics measurements and the use of the Avrami equation to fit the data[J]. Polymer Testing, 2007, 26(2):222-231.

[12] 中华人民共和国国家标准 .GB/T1040.2—2006 塑料拉伸性能的测定 [S]. 北京 : 中国标准出版社，2006.
[13] 中华人民共和国国家标准 .GB/T9341—2008 塑料弯曲性能的测定 [S]. 北京 : 中国标准出版社，2008.
[14] 中华人民共和国国家标准 .GB/T19466.3—2004 塑料差示扫描量热法 (DSC) 第 3 部分 : 熔融和结晶温度及热焓的测定 [S]. 北京 : 中国标准出版社，2004.

Research on the preparation and properties of glass fiber reinforced recycled polypropylene composites

Wen Haoyu, Wu Bo, Zhou Min, Zhou Yi

(Sichuan Yibin Plas Packaging Material Co. LTD., Yibin 644007, Sichuan, China)

Abstract: This paper systematically investigates the mechanical and thermal properties of glass fiber reinforced recycled polypropylene (PP) composites, using recycled PP as the matrix and adding different proportions of glass fiber (GF), toughening agents, compatibilizers, and other additives. The composites were prepared using the melt blending method, with a focus on examining the effects of elastomeric toughening agents, compatibilizer systems such as KT-1D/CMG9801/CMG5701, and whisker fillers on the tensile strength, bending properties, impact resistance, and crystallization behavior of the composites. The results indicate that the addition of 30% glass fiber significantly enhances the rigidity of recycled PP. When combined with 5% CMG9801 compatibilizer and 0.2% phosphate nucleating agent, the tensile strength of the composite reaches 82.48 MPa, and the bending modulus reaches a high of 6632.51 MPa. The addition of elastomers effectively improves the toughness of the material, but excessive addition can reduce the rigidity. DSC analysis shows that the phosphate nucleating agent significantly increases the crystallization temperature (from 110.5 ℃ to 132.5 ℃) and crystallinity (from 37.9% to 53.1%) of recycled PP. High crystallinity is the microstructural basis for the high rigidity of the composite. This study provides important formulation design basis and technical reference for the high-value utilization of recycled PP.

Key words: recycled polypropylene; glass fiber; toughening modification; differential scanning calorimetry; high-value utilization

(R-03)

