

物理法回收 PET 高值化应用研究

邓小亮, 周欣, 周易, 魏阳

(四川省宜宾普拉斯包装材料有限公司, 四川 宜宾 644007)

摘要: 选用市场上物理法回收的 PET 蓝白片为原料, 添加不同种类的调色剂, 研究了其对回收 PET 蓝白片色度的影响, 研究表明, 调色剂 A 能够很好的保证回收 PET 色度, L、b 值分别为 70.94、-5.61。考察了不同增韧剂和不同填充物对回收 PET 力学性能的影响, 增韧剂 8900 在同等添加量下对回收 PET 韧性提升最高, 达到了 18.77 kJ/m², 云母对回收 PET 的热变形温度提升最高。此外, 研究表明: 扩链剂能够很好的恢复回收 PET 因高温降解等造成的黏度损失和冲击下降。对于回收 PET 注塑加工, 采用脱模剂 A 能够在保证透明性的同时, 解决注塑黏模的问题。上述研究内容极大丰富了回收 PET 可应用范围, 为其高值化应用提供了数据参考。

关键词: 物理法回收; PET; 高值化应用; 力学性能

中图分类号: TQ323.41

文献标识码: B

文章编号: 1009-797X(2025)07-0009-04

DOI: 10.13520/j.cnki.rpte.2025.07.003

0 前言

高分子材料从诞生至今, 性能和种类都得到了极大的发展, 其高性能和轻量化等给人类的生活带来了诸多便利。其中热塑性聚酯聚对苯二甲酸乙二醇酯 (PET), 因优异的可纺性、透明性、耐化学品性等, 被广泛应用于纺丝、食品包装、薄膜领域。2023 年国内聚酯产能调整为 7 442 万 t, 其中纤维级产能约 698.5 万 t, 瓶级 PET 产能约 1 297.5 万 t, 涤纶长丝产能约 4 248 万 t, 涤纶短纤产能约 946 万 t, 膜级 PET 产能约 252 万 t。

其中 PET 瓶由于价格低廉、安全无毒、透明性高、阻隔性能较好等优势, 成为了矿泉水、食用油、乳制品等食品饮料包装领域的首选材料, 且其应用范围随着 PET 的功能性产品种类的完善正在不断拓宽。PET 瓶使用过程中材料污染小, 同时全球 PET 瓶回收系统分布广, 随着全球环境问题的日益凸显, PET 瓶的回收利用成为了解决塑料污染, 降低碳排放的有效途径^[1-5]。

目前 PET 瓶回收分为化学回收和物理回收, 化学法回收通过 PET 的解聚反应, 在特定条件下将 PET 降解为小分子单体, 可重新聚合制得 PET 或用作其它合成原料。根据所选用降解剂的不同, PET 解聚方法包括醇解法、糖酵解法、水解法、胺/氨解法等。物理回收法是将废 PET 瓶经过分离、破碎、洗涤及干燥处理后进行再造粒的方法。回收的 PET 瓶主要应用

于瓶子、纺丝、片材、膜。为了进一步拓宽物理法回收 PET 瓶子的应用领域, 提高其附加值, 本文从回收 PET 切片调色、增韧、填充增强改性、扩链、注塑脱模等方面研究了各种类型的改性剂对回收 PET 性能的影响, 为回收 PET 的高值化应用提供了数据参考^[6]。

1 实验部分

1.1 主要原材料

回收 PET 瓶片, 蓝白片, 六盘水爱而泰可环保科技有限公司; 瓶级 PET 切片, 市售; 蓝剂, 工业级, 嘉洛斯塑料着色 (苏州) 有限公司; 调色剂 A, 食品级, 上海瀚晖新材; 蓝色母, 市售; 扩链剂, 市售; 滑石粉, 12500 目, 上海缘江化工有限公司; 硅灰石, 市售; 高岭土, 市售; POE, 市售; 增韧剂, 8900, 阿科玛; TPEE, 市售; 云母, 150-S, 杭州崇科新材料有限公司; PETS, 市售; 脱模剂, 691, 佛山市翁开尔贸易有限公司; 脱模剂 A; 市售; 脱模剂, CST-100B, 北京英盛宏达有限公司。

1.2 设备及仪器

注塑机, MA1600/540, 海天塑机集团有限公司; 黏度分析仪: 3H-2000 系列, 贝士德仪器科技 (北京) 有限公司; 色度仪, labScan XE, Hunterlab; 缺

作者简介: 邓小亮 (1990-), 男, 硕士研究生, 主要从事功能性聚酯研发及相关管理工作。

口冲击试验机, QT-7045-MDL, 高铁检测仪器有限公司; 电子拉力试验机, 深圳万测实验设备有限公司; 热变形温度仪, SS-3900HV3, 松恕仪器有限公司; 差热扫描量热仪, DSC214, 德国耐驰公司; 热重分析仪, TG209 F1, 德国耐驰公司; 双螺杆挤出机: HPL27/40 型, 成都先鋒塑胶装备有限公司; 熔融指数仪, FR-1811A, 上海发瑞仪器科技有限公司; 除湿干燥机: GCD25/60, 广为塑料机械有限公司。

1.3 试样的制备

制样前须将蓝白片置于温度为 140 °C 的除湿干燥机中干燥 4 h。然后将干燥好的蓝白片与空心玻璃微珠、增韧剂、扩链剂等, 分别按比例加入到搅拌器中, 搅拌 5 min。

在双螺杆挤出机上, 对上述混合均匀的蓝白片/助剂复合原料进行造粒。挤出温度为 230 °C, 245 °C, 255 °C, 265 °C, 265 °C, 275 °C, 275 °C, 270 °C, 螺杆转速为 421 r/min。

将各配方回收 PET 改性造粒粒子样品置于热风烘箱, 在 140 °C 温度下干燥 5 h, 使用注塑机注塑力学性能测试所需标准样条, 注塑温度设置为: 245 °C、265 °C、275 °C、275 °C、270 °C、272 °C。

1.4 性能测试

特性黏度、色度测试参照 GB/T 14190—2017 进行; 冲击性能测试参照 GB/T 1043.1—2008 进行, 拉伸性能测试参照 GB/T 1040.2—2022 进行; 采用差热扫描量热仪和热失重分析仪测试样品的热性能, DSC 参数: 流速 50 mL/min, 升温速率 10 °C/min, 首次升温 30~280 °C, 二次升温 50~280 °C。热变形温度, 使用松恕仪器有限公司 SS-3900HV3 热变形温度仪按 GB/T1643—2004 检测; 熔融指数测试, 在熔融指数仪上, 以 2.16 kg、270 °C 条件进行测试。

2 结果及讨论

2.1 调色对物理回收 PET 外观的影响

表 1 不同调色剂色度对比

指标	瓶级 PET 切片	蓝白片	蓝剂	调色剂 (瀚晖)	蓝色母
L	86	69.67	67.53	70.94	65.11
a	-2.5	-0.9	-0.71	-1.18	-0.28
b	-1.4	0.83	-2.94	-5.61	1.07

备注: 蓝剂、色油、色母添加比例 0.1% (质量分数)。

对物理法回收的蓝白片采用了市面上常见的三种调色剂进行了调色, 对色度 (Lab) 进行了测试, 数据如表 1 所示。从表中数据可以看出, 原生物理法回

收的蓝白片, L 值较瓶级 PET 切片降低了 18.98%, b 值上升了 159.28%, 这一数据表明, 回收 PET 在热和氧的作用下发生了降解, 以及铈催化剂还原等副反应造成颜色变差。这样一来, 严重影响了后续产品的美观, 例如注塑家居收纳类产品, 颜色看起来发暗、发黄。对比蓝剂、调色剂调色剂 (瀚晖)、蓝色母调色结果, 调色剂调色剂 (瀚晖) 对于蓝白片的颜色纠正最为明显, 在保证 L 值的同时, 底色较蓝。蓝色母由于色粉耐温性不如色油, 相较于蓝白片其 L 值反而有所下降, b 值上升。借助上述调色经验和对比数据, 能够保证回收 PET 在高端透明应用上更接近 PET 新料, 提升回收 PET 的可循环次数。

2.2 增韧剂对物理回收 PET 力学性能的影响

不同增韧剂对回收蓝白片力学性能影响如表 2 所示, 原生蓝白片的冲击强度为 3.7 kJ/m², 拉伸强度为 56.9 MPa, 在添加了 POE、TPEE、8900 后冲击强度分别为 15.34 kJ/m²、9.5 kJ/m²、18.77 kJ/m², 提高了 3.14 倍、1.56 倍、4.07 倍, 可以得出市面上常见的增韧剂均能够有效的提升回收 PET 的透明度。但是考虑到 PET 加工温度较高, 在做增韧剂选择时, 通常需选择耐热性较高的增韧剂。从表中数据可以看出, TPEE 的增韧效果较其它两种增韧剂效果相差较大, 这是由于 TPEE 作为弹性体自身韧性不如 POE 和 8900, 同时部分酯交换和热降解副反应进一步阻止了其对于蓝白片冲击性能的提升。从上表研究结果可以得出, 当回收 PET 应用于家电、包装配件等需要有较高冲击的场所, 研究人员可以适当的选择加入合适类别的增韧剂改善回收 PET 韧性, 提高其应用范围。

表 2 不同增韧剂对回收蓝白片力学性能影响

指标	蓝白片	10%POE	10% TPEE	10% 8900
冲击强度 / (kJ·m ⁻²)	3.7	15.34	9.5	18.77
拉伸强度 / MPa	56.9	48.7	51.72	45.13
断裂伸长率 / %	384	439.76	375	648.19

2.3 不同填充物对回收 PET 理化性能的影响

不同填充物对回收 PET 理化性能的影响如表 3 所示, 在添加了填充物后蓝白片的冲击性能、弯曲强度和弯曲模量均有提升。其中综合性能较好的为云母, 冲击强度较蓝白片提高了 49.13%, 热变形温度提升了 6.5 °C。云母作为片层状填料可以部分替代玻纤, 在尼龙改性和 PET 玻纤改性领域均有使用。填充物对于理化性能的改进, 主要原因在于其可以作为异相成核的晶核生长点, 提升 PET 结晶度, 细化晶粒。另外, 作为补强材料使得回收蓝白片的弯曲强度和模量得到

提高。此研究结果对于 PET 在工程塑料的应用改进有一定指导意义，特别是需要提高耐温性的场合。

表 3 不同填充物对回收 PET 理化性能的影响

指标	蓝白片	滑石粉	云母	高岭土	硅灰石
冲击强度 / (kJ·m ⁻²)	3.7	5.04	5.518	5.658	5.59
弯曲强度 / MPa	70.53	72.67	78.91	71.33	73.06
弯曲模量 / MPa	1 923	2 154.13	2 323	2 087	2 116
热变形温度 / °C	65	70.3	71.5	68.3	68.5

备注：填充物添加量均为 5%。

2.4 扩链剂含量对回收 PET 理化性能的影响

添加不同量的扩链剂对回收 PET 理化性能影响如表 4 所示：随着扩链剂含量的增加，回收 PET 冲击强度逐渐增加，添加 1% 时，冲击强度提高了 36.2%。熔融指数则相反，随着扩链剂的增加而降低，这是由于部分交联和黏度增加所导致的。

表 4 扩链剂含量对 PET 理化性能影响

指标	蓝白片	0.5%	0.7%	1%
黏度 / (dL·g ⁻¹)	0.69	0.739	0.802	0.911
熔融指数 / [g·(10 min) ⁻¹]	41	16.18	14.2	6.85
冲击强度 / (kJ·m ⁻²)	3.7	4.1	4.7	5.8

回收 PET 由于经过注塑和挤出造粒反复的高温加工，其分子量降低，性能恶化，从上表数据可以看出，扩链剂可以很好的弥补这些性能的丢失。但其熔融指数损失也相对较大，添加 1% 时，熔融指数降低到了 6.85 g/10 min，这一数据对于后续的注塑加工很是不利，需要提高注塑压力和温度等才能保证注塑产品饱满度。因此，针对此研究结果，在通过扩链剂提升回收 PET 性能时应该综合考虑，重点还应关注后续的加工应用领域。

2.5 脱模剂对回收 PET 透明性的影响

脱模剂对回收 PET 透明性影响如表 5 所示：对比上表数据可以发现，脱模剂 A 加入后能够保证回收 PET 透明性，而其它类型的脱模剂均使回收 PET 的透明性变差。PET 在注塑时，特别是在注塑异形件和薄壁深腔产品时，其脱模性较差，经常拉伤产品或损坏

模具。添加脱模剂能够很好的解决这一问题，但是要保持聚酯透明性这一特性，对于脱模剂的选择是一难点。

表 5 脱模剂对回收 PET 透明性的影响

助剂	蓝白片	PETS	CST-100B	691	脱模剂 A
色板透光率 / %	88.48	87.27	86.42	87.59	88.59
色板雾度 / %	1.26	1.61	3.1	2.17	0.87

通过本文脱模剂的选择，能够进一步发挥 PET 透明性优势，在更多的注塑产品和市场上得到应用，为回收 PET 高值化提供了参考。

3 结论

(1) 回收蓝白片在反复加工后颜色会变差，以至于在一些高外观要求场合不能使用，添加一些复合型调色剂，能够帮助提高 L、b 值。

(2) 在一些工程塑料应用领域需要 PET 具备高冲击强度、高耐热等，可通过选择无机填充物和 8900 增韧剂来满足使用要求。

(3) 扩链剂和脱模剂的使用对于回收 PET 的再造粒和注塑加工至关重要，控制好扩链剂和脱模剂的种类以及添加量，能够延长 PET 的回收使用次数，获得外观和综合性能优异的回收 PET 材料。

参考文献：

[1] 刘潇. 循环利用聚酯纤维再生资源变废为宝潜力巨大 [J]. 聚酯工业, 2017,30(03):23-26.

[2] 王文茜, 闫柯柯, 冯传意, 等. 废旧塑料的回收与利用 [J]. 再生资源与循环经济, 2024,17(01):48-50.

[3] 刘奇汶, 毕莹莹, 董黎明, 等. 基于生命周期评价的原生和再生 PET 纤维环境影响对比分析 [J]. 环境工程技术学报, 2023,13(04):1 635-1 642.

[4] 温浩宇, 阳培翔, 高灵强, 等. PET 包装材料的绿色环保性浅析 [J]. 橡塑技术与装备, 2021,47(10):19-22.

[5] 赵恬娇, 董亚鹏, 王淑惠, 等. 回收 PET 力学性能的改性研究进展 [J]. 工程塑料应用, 2023,51(10):167-172.

[6] 肖勇, 周欣, 李俊峰, 等. 废弃 PET 和 PE 合金的制备及力学性能研究 [J]. 聚酯工业, 2019,32(01):19-21.

Research on the high-value application of
PET through physical recycling

Deng Xiaoliang, Zhou Xin, Zhou Yi, Wei Yang

(Sichuan Yibin Plus Packaging Material Co. LTD., Yibin 644000, Sichuan, China)

Abstract: This article uses PET blue and white sheets recovered by physical methods in the market as raw materials, and adds different types of toners to study their effects on the chromaticity of recovered PET blue and white sheets. The research results indicate that toner A can effectively ensure the chromaticity of recycled PET, with an L value and b value of 70.94 and -5.61, respectively. In addition, this article also explores

the effects of different toughening agents and fillers on the mechanical properties of recycled PET. The results showed that at the same addition amount, toughening agent 8900 had the best effect on improving the toughness of recycled PET, reaching 18.77 kJ/m², while mica had the most significant effect on increasing the thermal deformation temperature of recycled PET. The study also showed that chain extenders can effectively restore the viscosity loss and impact strength decrease caused by high-temperature degradation and other factors in recycled PET. For the injection molding process of recycled PET, the use of release agent A can solve the problem of mold sticking during the injection molding process while maintaining transparency. The above research significantly expands the application scope of recycled PET and provides reliable data support for its high-value applications.

Key words: physical recycling; PET; high-value applications; mechanical property

(R-03)

智慧工厂——制造业转型升级的新引擎

Smart factory — a new engine for manufacturing transformation and upgrading

在科技浪潮的推动下，制造业正经历着一场前所未有的变革，智慧工厂作为这场变革的核心力量，正引领着行业迈向全新的发展阶段。

智慧工厂系统解决方案，是构建智慧工厂的基石。它并非简单的技术堆砌，而是将物联网、大数据、人工智能、云计算等前沿技术深度融合，为工厂的各个环节提供高效的解决方案。在生产环节，通过部署大量的传感器，实时采集设备运行数据、生产进度信息等，利用大数据分析技术对这些数据进行深度挖掘，能够提前预测设备故障，实现预防性维护，减少停机时间，提高生产效率。同时，借助人工智能算法，对生产流程进行优化，实现生产资源的合理配置，降低生产成本。在物流环节，智慧工厂系统解决方案能够实现原材料、半成品和成品的智能仓储与配送。通过自动化立体仓库和智能搬运设备，结合物联网技术，实现货物的快速、准确出入库和配送，提高物流效率，降低库存成本。

智慧工厂建设方案，则是将智慧工厂系统解决方案落地实施的具体规划。它需要从工厂的整体布局、设备选型、网络架构等多个方面进行综合考虑。在工厂布局上，要充分考虑生产流程的顺畅性和物流的高效性，合理规划生产区域、仓储区域和物流通道。在设备选型方面，要选择具有智能化、自动化功能的设备，这些设备能够与智慧工厂系统进行无缝对接，实现数据的实时交互和共享。网络架构是智慧工厂的“神经系统”，要构建高速、稳定、安全的网络环境，确保各个设备和系统之间能够实时、准确地传输数据。此外，智慧工厂建设方案还需要注重人才培养和团队建设，培养一批既懂制造业又懂信息技术的复合型人才，为智慧工厂的运营和维护提供有力保障。

智慧工厂管理平台，是智慧工厂的“大脑”，它对整个工厂的运行进行实时监控、调度和管理。通过智慧工厂管理平台，管理人员可以随时随地查看工厂的生产进度、设备状态、质量数据等信息，实现对工厂的远程管理和决策。平台还具备强大的数据分析功能，能够对生产过程中的各种数据进行深度分析，为管理人员提供决策支持。例如，通过对质量数据的分析，可以及时发现生产过程中的质量问题，并追溯到具体的生产环节和设备，采取针对性的措施进行改进。同时，智慧工厂管理平台还可以实现与供应商、客户的信息共享，提高供应链的协同效率，提升客户满意度。

智慧工厂的建设，不仅能够提高企业的生产效率和产品质量，降低生产成本和运营风险，还能够增强企业的市场竞争力。伏锂码云平台作为技术载体，可以深度整合物联网、大数据、人工智能、云计算等前沿技术，提供强大支持。在未来的发展中，智慧工厂将成为制造业的主流模式。企业应积极拥抱这一变革，制定适合自己的智慧工厂系统解决方案、建设方案，搭建高效的智慧工厂管理平台，加速向智慧工厂转型，在激烈的市场竞争中抢占先机，实现可持续发展。让我们共同期待智慧工厂为制造业带来更加辉煌的明天。

摘编自“搜狐新闻”

(R-03)