

低碳背景下高透明聚丙烯与玻璃在家电行业的应用性能对比研究

周之运

(海信冰箱有限公司, 山东青岛, 266736)
DOI:10.61369/CDCST.2025040029

摘 要: 在“30·60双碳”的政策背景下, 环保轻质材料与绿色设计制造至关重要。文章以洗衣机为例, 从材料的性能、工艺加工、可持续性方面将对比传统玻璃与聚丙烯 (PP)。通过分析, PP 虽有耐刮擦、耐高温形变、耐洗涤剂及抗黄变等不足, 但具备质轻、耐冲击、成本低、碳排放低的特点。文中还介绍高透明聚丙烯产品, 其核心特点在于高透外观、节能低碳的环保价值, 以及轻量化省料的经济价值。

关 键 词: 双碳政策; 普通玻璃; 聚丙烯; 节能低碳; 洗衣机

作者简介: 周之运, 硕士, 研发工程师, 就职于海信冰箱有限公司。E-mail: zhouzhiyun@hisense.com。



周之运

1. 行业视角

在我国“双碳”战略目标深化、全球碳中和步伐提速、绿色规则体系不断完善的大背景下, 家电行业需要主动贯彻绿色发展理念, 积极履行节能环保社会责任, 全力推进绿色低碳转型, 才能实现可持续发展, 而这正是行业迈向高质量发展的内在要求。

2023年5月, 我国发布的《中国家用电器行业2030年前双碳行动方案》中明确了具体目标及实现路径, 其中应用环保低碳、轻质化材料, 推广绿色产品设计及制造成为重要路径。例如, 连续碳纤维增强聚丙烯 (PP) 热塑性复合材料已量产应用于家用空调室内机的外壳, 不仅质轻, 同时可设计性强, 呈现出高级的金属质感, 外表光滑美观。玻纤增强尼龙 (PA) 材料不仅强度高, 且具有良好的蠕变性, 已量产应用到冰箱的门铰链, 取代原来的铝合金门铰链, 不仅实现了轻量化, 同时材料价格低、生产工艺简化, 制件成本下降, 且大幅度降低碳排放。透明 PP 已量产应用于波轮洗衣机门盖、冰箱面板等制件, 替代传统的普通玻璃, 文章以洗衣机为例, 从材料的性能、工艺加工、可持续性方面将传统玻璃与 PP 进行了对比分析, 同时介绍了高透明聚丙烯产品的主要特点。

2. 性能对比

从表1中看出: PP密度仅为玻璃的1/3左右, 即在同体积外壳下, 采用PP可降低洗衣机整机重量, 实现轻量化,

不仅方便运输、安装, 也减少机身支撑结构的设计压力; 且PP受温度影响小, 加工后密度无显著变化, 可通过调整壁厚平衡制件的重量与强度, 而玻璃密度是PP的2.7~3倍左右, 厚度增加会显著推高制件重量, 进一步增加了制件的重量, 提升了运输能耗, 安装时需额外固定 (如支架、螺栓) 防止安装时倾倒, 玻璃为脆性材料, 意外倾倒后易破碎产生尖锐碎片, 安全风险远高于PP (仅塑性形变、无破碎)。

表1 PP与普通玻璃性能对比

| 对比项 | PP | 普通玻璃 |
|--------|-----------------------------|---------------------------|
| 密度 | 0.90~0.92 g/cm ³ | 2.4~2.8 g/cm ³ |
| 冲击强度 | 2~5 kJ/m ² | < 1 kJ/m ² |
| 莫氏硬度 | 2~3 | 6.5~7 |
| 长期使用温度 | < 60℃ | > 100℃ |
| 耐化学性 | 差 | 优 |
| 抗黄变 | 易黄变; 不可逆 | 不易黄变 |
| 清洁便利性 | 不易清洁 | 易清洁 |

洗衣机在搬运、日常清洁、生活中难免会发生磕碰, PP作为一种韧性材料, 常温下冲击性能优异, 常温缺口冲击强度约2~5 kJ/m²; 受冲击时优先发生塑性形变而非脆性破碎, 从而有效避免制件直接破坏。其中, 均聚PP的常温缺口冲击强度通常为2~3 kJ/m², 无规共聚PP的常温缺口冲击强度约为5 kJ/m², 部分改性无规PP甚至更高; 而透明PP产品因需低结晶度以保障透光性, 基本上以无规共聚PP为基础基材开发。但玻璃作为脆性材料, 冲击强度<1 kJ/m², 受碰撞易碎裂, 产生的锋利碎片存在划伤用户或损坏内部其他部件的安全隐患, 不适配家电“耐用+安全”需求。

PP作为一种常用塑料, 虽具备质轻、耐冲击、成本低

等优势，但与玻璃相比，在洗衣机的应用场景中，还存在耐刮擦与表面耐久性，耐高温与形变风险，耐洗涤剂与化学稳定性，外观持久性与抗黄变，清洁便利性等维度的一些差异。从表1中看出：① PP莫氏硬度仅 2~3，日常操作中易被指甲、钥匙、洗涤剂瓶等硬物刮出划痕，划痕易藏匿水垢、洗涤剂残留，越用越脏，且无法修复，严重影响面板洁净感与整机外观，而普通玻璃的莫氏硬度 6.5~7，表面致密坚硬，日常刮擦无痕迹；即使接触硬物也不易受损，长期使用仍保持平整光滑，无藏污隐患，即玻璃具有更优异的耐刮擦与表面耐久性；②洗衣机烘干功能运行时，面板局部可能接触 40~60℃（甚至更高）的热量，PP 长期处于该环境下易出现轻微软化、翘曲或表面不平整，影响与机身的贴合度，而玻璃耐高温性能稳定，即使长期接触洗衣机工作时的局部高温，也不会发生形变、软化，始终保持结构平整与贴合性；③长期接触洗衣机用的碱性洗涤剂、强效除垢剂（含酸性成分），PP 表面可能出现轻微溶胀、失光或“发雾”，导致光泽度降低；若洗涤剂残留未及时清理，还可能加速表面老化，而普通玻璃化学惰性极强，不与碱性洗涤剂、除垢剂等发生反应，表面始终保持透亮，即使长期接触洗涤剂也无失光、溶胀问题；④若洗衣机放置于阳台（接触紫外线）或卫生间（潮湿 + 光线），PP 长期受光线照射易发生黄变，外观老化明显，整机颜值下降；且黄变不可逆，而普通玻璃无黄变风险，透明度与表面色泽长期稳定，无论接触光线、潮湿环境，均能保持初始外观，使用寿命与整机匹配。⑤ PP 表面虽光滑但存在微观孔隙，水垢、洗衣液泡沫残留易附着在表面，尤其有划痕后更难清洁，需反复擦拭；有可能滋生细菌，而普通玻璃表面绝对致密无孔隙，水垢、污渍仅附着于表层，轻轻擦拭即净，无需用力清洁，且不易滋生细菌，清洁效率高。

3. 工艺加工对比

波轮洗衣机外壳需集成进水口、操作面板安装位、散热孔等细节，从表2中看出：PP 效率高，可一次成型，加工周期短，适合批量生产；而玻璃加工难度大，复杂结构需多次切割、打磨，工序多（周期约数小时），且易产生废品。同时 PP 加工设备能耗低、寿命长，玻璃需专用高温窑炉，设备投资大、能耗高，且加工环境温度高，不利于车间操作。同时家电行业需频繁更新外壳设计（如颜色、

造型迭代），PP 可快速换模适配，玻璃则需重新开发模具，成本高、周期长。

表2 PP与普通玻璃工艺加工对比

| 对比项 | PP | 普通玻璃 |
|-------|--------------------------|---------------------------------|
| 成型方式 | 注塑成型可一体成型复杂结构 | 吹制 / 压制成型，仅能实现简单平板或曲面，复杂结构需二次加工 |
| 加工温度 | 190~200℃ | 1500℃以上熔融，后续退火需 300~500℃ |
| 造型灵活性 | 可通过模具调整实现不同尺寸、纹理（如磨砂、高光） | 受成型工艺限制，仅能做固定厚度的简单形态，纹理加工难度大 |

4. 可持续性

洗衣机外壳批量生产时，PP 生产线的单位能耗远低于玻璃，以美利肯 NX UltraClear™ PP 为例，其可在 190~200℃加工进一步减少能源消耗，直接降低 8%~12% 的 CO₂ 排放，同时低温加工缩短冷却时间，注塑周期缩短 10%，间接提升生产效率与碳效率（表 3）。

表3 PP与普通玻璃可持续性对比

| 对比项 | PP | 普通玻璃 |
|------|---------------------------------|--|
| 生产能耗 | PP 生产能耗低 | 极高（需 1500℃以上高温熔融石英砂等原料，能耗是 PP 的 3~5 倍） |
| 碳排放 | 排放低 | 高（高温生产过程排放大量 CO ₂ ） |
| 回收技术 | 成熟（物理回收为主，破碎后可重新注塑成洗衣机配件或其他塑料件） | 技术成熟，但成本高（需分拣去除杂质，再高温重熔，能耗接近原生玻璃生产） |

一台洗衣机外壳（约 3~5kg），PP 生产碳排放仅为玻璃的 1/5 左右，契合家电行业可持续发展的趋势；同时 PP 回收便捷，洗衣机报废后，PP 外壳可直接拆解、破碎，回收利用率达 90% 以上，PP 回收过程工艺流程如图 1 所示，其回收工艺步骤为：

- ①破碎（Shredding）：将物料破碎成小块；
- ②清洗（Washing）：通过约 40℃的循环水浴，去除大部分残留物、标签及黏合剂。
- ③密度分选（Flotation）：利用不同塑料的密度差异进行分离，部分塑料会下沉，部分则上浮。PP 的密度小于 1 g/cm³，因此会在水中上浮，这些上浮的塑料将被分离出来。
- ④颜色分选（Colour sorting）：根据回收厂的实际情况，可能会增加颜色分选环节。
- ⑤制备颗粒料（Pellets）：将塑料薄片进一步加工（熔融）成颗粒料——这便是最终的再生料。

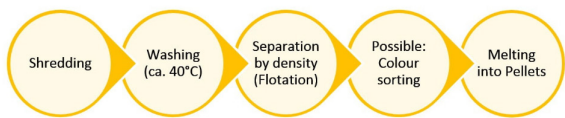


图1 PP回收过程工艺流程

5. 高透明聚丙烯主要特点

高透明聚丙烯应用场景聚焦在注塑包装、家电透明部件，如冰箱抽屉。其以低成本替代传统材料 PS、PVC 或者玻璃，同时保留透明性与功能性，比如洗衣机的外壳面板。其主要特点如下：

5.1 超高透明性和透光率

通过使用高透明聚丙烯，消除传统聚丙烯的“乳白色外观”，实现类玻璃高透明性，满足包装、家电等领域的可视化需求。而且雾度显著降低，厚壁部件仍保持高透光率。

5.2 低密度与轻量化

PP 本身密度极低，较 PE、PS、PVC、PET 更省料，轻量化优势显著。

5.3 耐热与抗冲击平衡

基础性能满足日用包装、日用家电需求；而且，良好的抗冲击性避免运输储存中破损。

5.4 材料利用率高

使用同样重量的材料，PP可生产更多的部件，降低单位成本，而且，相比其他材料，PP生产中的碳排放量也更低。

5.5 加工窗口宽泛

允许更灵活的温度控制，避免因工艺波动导致的雾度差异，减少废品率。

6. 透明聚丙烯增透的技术原理

作为一种部分结晶的聚合物，聚丙烯的透明度主要受结晶过程影响。一方面，聚合物中非晶区和晶区对可见光的折光指数不同，导致对入射可见光产生散射现象；另一方面，聚合物晶粒尺寸大小对可见光的透光性有差异，晶粒过大会产生对可见光折射现象。以上两者都会阻挡可见光通过聚合物，从而削弱透明度。由此可见，调控结晶过程以降低结晶度和球晶尺寸是增加聚丙烯透明度的关键^[1]。

落实到具体的方法包括共聚单体的引入、催化剂体系

设计、聚合工艺控制、添加剂体系选择等。在聚丙烯分子链上引入其它单体，如乙烯，能够打破分子结构的对称性和规整性，破坏结晶性，从而达到聚丙烯增透目的。共聚单体恰到好处的引入离不开催化剂体系的助力，特殊设计的 Z-N 催化剂能够提升共聚单体的分布均匀性，茂金属催化剂的活性中心对于单体三维立体结构排列可以起到调控作用。在聚合环节，共聚单体的注入量和加氢方式等会通过影响产品相对分子质量的分布来干扰透明聚丙烯最佳状态的呈现。

方鹤等^[2]研究表明，最佳二甲苯可溶物和乙烯注入量分别在 5.5%~6.5% 和 3%~4% 区间；生产高熔体流动速率的透明聚丙烯时通过加氢方式的优化有利于产品透明性的提高。引入成核剂是利用异相成核原理，通过加快结晶速度，达到减少晶粒尺寸的目的以提高聚合物透明性。抗氧剂体系通过对黄色指数的贡献来影响产品透明度，合理添加量范围内的除酸剂具有一定的成核能力，因此需根据要求合理选择添加剂种类和数量。

表 4 增加聚丙烯透明度的主要方法

| 主要方法 | 提升透明度的原理 |
|---------|--|
| 共聚单体引入 | 打破分子原有等规序列结构，破坏结晶性，优化晶粒尺寸。 |
| 催化体系设计 | 特殊设计的 Z-N 催化剂能够提升共聚单体的分布均匀性；茂金属催化剂的活性中心对于单体三维立体结构排列可以起到调控作用。 |
| 聚合工艺控制 | 共聚单体的注入量和加氢方式等会通过影响产品相对分子质量的分布来干扰透明聚丙烯最佳状态的呈现。 |
| 添加剂体系选择 | 成核剂的加入，可加快结晶速度，减少晶粒尺寸。 |

7. 技术展望

国内透明聚丙烯的市场在不断发展与增长，年需求量已近 300 万吨。从应用场景来看，透明聚丙烯已经在很多的应用中替代了传统的无机材料，但是在部分指标要求上，还有提升的空间。

7.1 透明聚丙烯的无毒性研究

部分成核剂的成分有“溶出”的风险，提升成核剂在透明聚丙烯应用过程中的适配性就成了行业内提升的方向。中空果汁瓶、餐盒食物储存、医疗包装材料等应用领域都对透明聚丙烯提出了“无毒”的需求，改善聚合物的溶出量就成了材料能否广泛应用的决定性因素^[3]。

7.2 透明聚丙烯的耐辐射研究

透明聚丙烯重要的应用场景之一是在医疗卫生领域，该

领域相关医疗器械的发展,推动了辐照灭菌这种高效消毒手段的广泛应用,作为医用材料,在受到辐射时如何保证聚丙烯材料的性能稳定也是行业重点关注的课题之一^[4]。

7.3透明聚丙烯的力学性能优化

较多的应用场景要求透明聚丙烯具有比较好的抗冲击性能,因此如何在保持无规共聚聚丙烯优异的光学性能的前提下,使其拥有嵌段共聚聚丙烯的抗冲击性能,是行业追逐的热点方向。透明聚丙烯一旦兼顾光学性能和力学性能,其在家电、汽车等耐用消费品以及日常家居用品中将拥有更为广泛的应用^[5]。

8.结论与展望

PP在以下几个方面优于玻璃。

(1) 密度: PP密度显著低于玻璃,更契合当下家电便携化发展需求,可用于打造家电中更轻巧便捷的组件。

可持续性: PP在生产、使用及回收全流程均具备低碳优势,而玻璃的生产、使用与回收全过程能耗较高,与PP存在较大差距。

抗冲性能: PP在通用塑料中抗冲性能表现优异,刚韧平衡的特性十分适配家电应用场景;玻璃材质则脆性明显,组件一旦碎裂便无法复原,还易引发安全隐患与人身伤害。

工艺加工: PP可通过注塑、挤出等多种加工方式灵活适

配不同造型需求,玻璃则成型温度高,尺寸调整灵活度较低。

循环使用: PP回收体系成熟,回收价值较高;玻璃回收成本高,实际回收利用的实用性偏低。

(2) PP作为一种常用塑料,虽具备质轻、耐冲击、成本低等优势,但与玻璃相比,在洗衣机的应用场景中,还存在耐刮擦与表面耐久性,耐高温与形变风险,耐洗涤剂与化学稳定性,外观持久性与抗黄变,清洁便利性等维度的一些差异。

(3) 高透明聚丙烯主要特点包括高透的良好外观,节能环保的环保价值和轻量化省料的经济价值,可以满足品牌商在实现可持续发展和降低成本两个方面的需求。

参考文献

- [1]张云飞,刘小婷,徐人威,等.透明聚丙烯的研究进展[J].合成树脂及塑料,2019,36(3):81-85.
- [2]方鹤,夏俊,杨建,等.生产工艺及助剂对透明聚丙烯产品雾度的影响[J].塑料助剂,2022(1):29-35.
- [3]冉崇文,湛基国,杨帆,等.成核剂对中MFR无规共聚聚丙烯性能的影响[J].合成树脂及塑料,2018,35(1):30-32.
- [4]程志远,高长青,丁雪佳,等.耐电子束辐照高分子材料改性研究进展[J].中国塑料,2017,31(12):9-14.
- [5]付莹,郝春波,李娇,等.高抗冲透明聚丙烯的性能及应用研究[J].塑料科技,2024,52(8):39-44.

Comparison of the Application of Ultra Clear Polypropylene and Glass in the Home Appliance Industry under a Low-carbon Background

Zhou Zhi-yun

(Hisense Refrigerator Co., Ltd., Qingdao, Shandong, 266736)

Abstract : Against the backdrop of China's "30-60 Dual Carbon" policy, environmentally friendly, lightweight materials and sustainable approaches to design and manufacturing have become increasingly important. Using washing machines as an example, this article compares traditional glass with polypropylene (PP) in terms of material properties, processing technology, and sustainability. The analysis shows that although PP has certain limitations—such as insufficient scratch resistance, poor resistance to high-temperature deformation, limited detergent resistance, and susceptibility to yellowing—it offers significant features including light weight, strong impact resistance, lower cost, and reduced carbon emissions. The article also highlights Ultra Clear polypropylene. Its key attributes include high transparency and superior aesthetics, coupled with strong environmental benefits in terms of energy efficiency and low carbon footprint. In addition, it delivers notable economic value by enabling lightweight designs and material savings.

Keywords : dual carbon policy; ordinary glass; polypropylene; energy-saving and low-carbon; washing machine