

# 高透明食品级 TPE-S 材料的配方设计与析出物控制研究

蒋红亮

浙江合复新材料科技有限公司 浙江杭州 310000

**【摘要】**热塑性弹性体S类(TPE-S)因弹性、加工流动性及可回收性佳,在食品接触领域应用价值突出,但传统材料存在透明性不足、低温弹性差、易析出小分子物质等问题,限制了其在高端领域的应用。本文结合共混改性理论与食品接触安全标准,系统研究高透明食品级TPE-S材料的配方设计及析出物控制机制。重点分析了基体树脂选型等因素对材料性能的协同调控规律,探索了助剂分子结构与析出特性的关联。通过优化配方与工艺,构建复合体系,实现性能与安全性同步提升。研究表明,采用SEBS与PP按7:3复配,添加特定增韧剂和抗氧化剂,可制备出性能优异的TPE-S材料,符合相关安全标准,为食品级TPE-S材料研发提供理论与技术参考。

**【关键词】**TPE-S材料;食品级;高透明;配方设计;析出物控制;SEBS

Research on Formulation Design and Precipitate Control of High-Transparency Food-Grade TPE-S Materials

Jiang Hongliang

Zhejiang Hefu New Material Technology Co., Ltd. Hangzhou, Zhejiang Province 310000

**【Abstract】** Thermoplastic elastomers of the S-class (TPE-S) demonstrate outstanding application value in food contact applications due to their excellent elasticity, processability, and recyclability. However, traditional materials suffer from limitations such as insufficient transparency, poor low-temperature elasticity, and susceptibility to small molecule precipitation, restricting their use in high-end applications. This study systematically investigates the formulation design and precipitate control mechanisms of high-transparency food-grade TPE-S materials by integrating blending modification theory with food contact safety standards. The research focuses on the synergistic regulatory effects of matrix resin selection on material properties and explores the correlation between additive molecular structures and precipitation characteristics. Through optimized formulations and processing techniques, a composite system was developed to achieve simultaneous improvements in performance and safety. The results demonstrate that blending SEBS and PP in a 7:3 ratio, combined with specific toughening agents and antioxidants, yields high-performance TPE-S materials compliant with relevant safety standards, providing theoretical and technical references for food-grade TPE-S material development.

**【Key words】** TPE-S material; food-grade; high transparency; formulation design; precipitate control; SEBS

## 一、引言

TPE-S以SEBS为基体,兼具橡胶高弹性与塑料加工便捷性,无需硫化即可成型,在食品接触领域的应用需求不断攀升。该领域对材料提出双重核心要求:高端食品器具需高透明性,同时要符合严格食品接触安全标准,避免小分子物质析出危害健康。当前研发存在两大技术瓶颈:一是透明性与弹性协同调控难,传统做法难以兼顾二者;二是析出物控制难,助剂因与基体相容性差等原因易析出超标。现有研究多聚焦单一性能优化,缺乏多目标协同系统设计,对析出物迁移机制分析不足,难以指导配方开发。因此,深入探索适配食品接触场景的TPE-S配方体系,揭示组分间作用机制意义重大。本文通过配方设计与机理分析,成功制备高透明、低析出的食品级TPE-S材料,为相关研发提供理论依据。

## 二、高透明食品级 TPE-S 材料的配方设计理论基础

### 2.1 TPE-S 材料的结构特性与食品级要求

TPE-S材料核心结构是“SEBS基体-软化剂-塑料组分”三相共混体系。SEBS作为弹性骨架,分子链段运动与相区分布决定材料弹性与透明性。纯SEBS透光率高但刚性、加工性差,需与塑料组分、软化剂共混,不过PP结晶区降低透明性,传统白油易析出。食品级TPE-S材料要同时满足性能与安全要求,配方设计需在“结构-性能-安全”间找平衡,关键是选相容性好、低迁移风险组分,抑制透明性破坏与小分子助剂析出。

### 2.2 透明性调控的核心理论

TPE-S材料的透明性由“组分折射率匹配”“相区尺寸控制”“结晶抑制”三大因素决定,本质是减少光线在材料内部的散射与吸收。折射率匹配是基础,各组分折射率差值需控制在0.01以内,否则会因折射与反射导致透光率下降。SEBS与PP折射率差0.03,直接共混会光散射,需添加相容剂调节界面折射率,改善相容性。相区尺寸控制是关键,若

相区尺寸超可见光波长会引发瑞利散射。SEBS 与 PP 共混时,相区尺寸受共混比例、剪切强度影响,需优化共混比例与加工工艺,将相区尺寸控制在 100–300nm。结晶抑制是补充,PP 结晶会形成晶区,需添加非晶态聚合物或成核抑制剂抑制结晶,减少晶区数量,进一步改善透明性。

### 2.3 析出物控制的理论依据

食品级 TPE-S 材料析出物主要源于三类组分:低分子量软化剂,因与 SEBS 基体相容性弱,在温度变化或接触溶剂时易迁移析出;小分子助剂,若分子链缺极性基团,易通过分子扩散脱离基体;未反应的单体或低聚物,在聚合或共混中残留,长期接触食品会缓慢析出。析出物控制核心理论为“相容性增强”与“迁移阻力提升”。相容性增强借助组分间分子间作用力,提高易析出组分与基体结合强度,如用高分子量环烷基白油替代传统白油,添加马来酸酐接枝类相容剂形成化学键合。迁移阻力提升通过调控材料结晶度、交联度或微观结构,增加小分子物质扩散路径长度,如适度提高 PP 结晶度形成致密网络,或通过物理交联构建三维结构,限制软化剂与助剂分子运动,从而减少析出。

## 三、高透明食品级 TPE-S 材料的配方设计

### 3.1 基体树脂与弹性组分的选型与配比

基体树脂与弹性组分选型要兼顾透明性、弹性与安全性,核心在于 SEBS 和塑料基体的协同匹配。SEBS 选高苯乙烯含量的线性结构产品,苯乙烯段含量过高或过低都会影响弹性,高线性结构 SEBS 分子链缠结均匀,透光率比星形结构高 5%–8%,加工流动性好,适合注塑成型。塑料基体采用无规共聚 PP 与 APP 复配体系,PP-R 结晶度低、结晶颗粒细小,APP 为非晶态聚合物,与 SEBS 折射率差值小且与 PP 相容性好,二者按 7:3 复配,形成“低结晶-高透明”基体,显著改善透明性。SEBS 与塑料基体配比是平衡弹性与透明性的关键,经试验,当 SEBS:塑料基体=7:3 时,各项性能指标良好,实现透明性、弹性与刚性的协同,为最优配比。

### 3.2 增韧剂与相容剂的选型

增韧剂与相容剂核心作用是改善组分相容性、提升低温弹性且不破坏透明性。增韧剂采用 POE-g-MAH 与透明 TPU 复配体系。POE-g-MAH 的 POE 主链与 SEBS 的 EB 段相容性好,MAH 接枝基团可改善 SEBS 与 PP 界面结合;透明 TPU 折射率与 SEBS 接近,低温弹性佳,能弥补 POE-g-MAH 极低温弹性不足。二者按 3:1 复配,添加量 8wt% 时,材料-30℃低温弹性恢复率从 75%提升至 85%,透光率保持 89.8%,雾度仅 2.9%。相容剂选用 SEBS-g-MAH 与 PP-g-GMA 协同体系,二者形成“双向界面键合”,改善 SEBS 与 PP 相容性,减少相分离。SEBS-g-MAH 添加量 2wt%、PP-g-GMA 添加量 1wt% 时效果最佳,过量或不足都会影响材料性能。

### 3.3 低迁移助剂的选型与用量控制

助剂选型遵循“低迁移、高相容性、无毒性”原则,重点控制抗氧化剂、润滑剂与软化剂析出风险。抗氧化剂采用受阻酚类 1010 与亚磷酸酯类 168 复配,1010 分子链长,与 SEBS 缠结强、迁移低;168 与 1010 有协同效应且与 PP 相容性好。二者按 2:1 复配,总添加量 0.3wt% 时效果最佳,添加量不足耐老化性差,过量则雾度上升、析出风险增加。润滑剂用芥酸酰胺与硬脂酸钙复配,芥酸酰胺改善加工流动性且与 SEBS 相容性好,硬脂酸钙环保且具热稳定作用。二者 1:1 复配,添加量 0.2wt% 合适,过量会在表面析出,不足则加工流动性下降。软化剂选高分子量环烷基白油,与 SEBS 缠结强、析出率低。添加量 15wt% 时,能平衡硬度、加工性与安全性,为最优添加量。

## 四、析出物控制机制与工艺优化

### 4.1 析出物的来源与迁移机制

食品级 TPE-S 材料析出物主要分三类,来源与迁移机制差异明显。一是软化剂析出。高分子量环烷基白油因与 SEBS 基体物理缠结不足,其分子链无极性基团,仅靠范德华力与 SEBS 的 EB 段结合。高温或接触溶剂时,分子热运动加剧,缠结作用被破坏,白油扩散析出,且迁移速率随温度升高指数增长。二是助剂析出,包含抗氧化剂与润滑剂,迁移机制是“浓度梯度驱动分子扩散”。若助剂与基体相容性差,扩散系数大,易快速析出;若含极性基团,与基体形成氢键,扩散系数减小,析出速率降低。三是低聚物析出,源于 SEBS 或 PP 聚合残留的低分子量片段,与基体缠结弱,长期服役时缓慢迁移至表面。经分析,析出物中低聚物占比 15%–20%,软化剂 50%–60%,助剂 20%–30%,故软化剂与助剂是析出物控制重点。

### 4.2 析出物控制的关键技术

析出物控制采用“相容性增强”“扩散阻力提升”“助剂结构优化”三大技术降低风险。相容性增强上,引入 SEBS-g-MAH 相容剂,借化学键合“锚定”白油与助剂,降低析出率;选用含极性基团助剂,形成氢键降低扩散系数。扩散阻力提升方面,“低温慢冷”使 PP 结晶细密,增加扩散路径;双螺杆挤出机高剪切形成致密网络,阻碍扩散。助剂结构优化则选用高分子量、高极性助剂降低迁移能力。三大技术协同作用,有效控制析出物,使材料符合食品接触安全标准。

### 4.3 制备工艺的优化

制备工艺对食品级 TPE-S 材料的透明性与析出特性影响显著,核心在于优化挤出与注塑工艺。双螺杆挤出工艺优化强调“剪切强度-温度-停留时间”协同。通过特定螺杆组合结构,利用错列捏合块增强剪切以控制相区尺寸;实施加工温度梯度控制,让组分充分熔融,防止 SEBS 热降解和 PP 过度结晶;合理设定螺杆转速、喂料速率与停留时间,保证组分均匀分散,避免助剂老化析出。注塑工艺优化聚焦“温

度-压力-冷却速度”平衡。合理匹配料筒与喷嘴温度，分两段调节注塑压力，先低压慢速防气泡，后高压快速填充型腔，并合理设定保压压力与时间以减少内应力。冷却工艺采用“梯度缓冷”，既避免快速冷却产生内应力、降低透光率，又防止缓慢冷却延长周期、增加析出物总量，有效提升材料性能。

## 五、性能表征与安全验证

### 5.1 宏观性能表征结果

高透明食品级 TPE-S 材料通过配方与工艺优化，实现了多性能协同提升，其宏观性能经综合评价表现优异。透明性上，透光率达 90.2%，雾度 2.8%，优于传统材料，且高温水煮后性能变化小，微观结构稳定。力学性能方面，Shore A 硬度 65，拉伸强度等指标良好，与纯 SEBS-PP 体系相比，拉伸强度和低温弹性恢复率均有提升，且性能波动小。耐老化性上，热老化和紫外老化后，拉伸强度等保持率较高，无明显变色或脆化，透光率变化小，抗氧化剂体系作用显著。耐化学性上，在多种溶液中浸泡后，拉伸强度保持率高，透光率变化小，析出物总量低于标准限值，未检出特定迁移物，符合食品接触安全要求。

### 5.2 微观结构与析出特性分析

借助多种分析手段对优化后的高透明食品级 TPE-S 材料展开研究。微观结构方面，SEM 观察显示材料断面平整，SEBS、PP 与增韧剂形成连续共混网络；TEM 观察表明相区尺寸集中在 180-220nm，SEBS 弹性相区均匀分散，增韧剂形成界面过渡层，可减少光散射、阻碍小分子扩散。析出物组成上，GC-MS 与 HPLC 分析显示，4%乙酸浸泡液中各析出组分占比明确且均低于安全限值，与传统配方相比，优化后材料白油和抗氧化剂析出量大幅降低，相容性增强与助剂优化有效抑制析出。分子链运动上，DMA 研究显示材料玻璃化转变温度低，常温下分子链段运动活跃、弹性优异，低温时损耗因子高、弹性恢复率高，储能模量适宜，能满足食品器具使用需求。

### 5.3 食品接触安全性验证

依据 GB 4806.7-2023 与 EU No 10/2011 标准，对高透明食品级 TPE-S 材料展开全面食品接触安全性验证。感官测试环节，材料经 60℃热水浸泡 2 小时后，无异味、变色，表面无析出物附着，满足感官要求。迁移测试方面，以 4%乙酸、50%乙醇、橄榄油模拟不同食品介质，在 70℃下浸泡

2 小时，析出物总量均低于标准限值，且未检出特定迁移物。毒理学评估中，急性经口毒性测试显示材料属实际无毒级，细胞毒性测试表明材料浸提液对 L929 细胞存活率超 90%，无细胞毒性。综合各项验证结果，该材料符合国内外食品接触安全标准，具备在婴幼儿餐具、食品密封件等高端食品接触场景中安全应用的条件。

## 六、研究结论与展望

### 6.1 研究结论

本文结合共混改性理论与食品接触安全标准，对高透明食品级 TPE-S 材料展开系统研究，得出以下主要结论：

在配方设计上，遵循“折射率匹配-相容性增强-低迁移”原则。以特定比例的 SEBS 与 PP-R/APP 为基体，复配实现折射率差值小；添加特定比例的增韧剂和相容剂，提升低温弹性与界面结合；选用高分子量环烷基白油和受阻酚类抗氧化剂抑制析出，最终材料透光率达 90.2%，雾度 2.8%，低温弹性恢复率高。

析出物控制机制为“相容性增强+扩散阻力提升”，通过化学键合与高分子量化提高结合强度，构建致密微观结构增加扩散路径，使析出物总量符合标准。

制备工艺影响显著，特定双螺杆挤出转速、注塑模具温度及梯度缓冷工艺，可实现组分均匀分散与内应力消除，材料力学性能稳定，耐老化与耐化学性优异，能满足高端食品接触场景长期使用需求。

### 6.2 研究展望

本文研究成果为食品级 TPE-S 材料研发提供理论支撑，但也存在不足及改进方向：

低温弹性优化：现有材料-30℃弹性恢复率 85%，难满足极寒地区或冷冻食品接触场景。后续可研发含氟弹性体或硅橡胶改性的复合增韧体系，利用氟橡胶优异低温弹性提升材料极低温性能，同时通过表面改性调控折射率，防止透明性降低。

析出物控制深化：现有研究对残留单体与低聚物控制不足。未来要结合聚合工艺优化，减少 SEBS 与 PP 中低聚物含量，开发“可降解助剂”，选用天然植物油基润滑剂与抗氧化剂，提升安全性。

功能化拓展：现有材料功能基础。可引入抗菌剂或抗雾剂，赋予其抗菌、抗雾性能，拓展在婴幼儿餐具、冷藏食品包装等场景的应用。

## 参考文献

- [1]李姝姝,程鹏飞,马应霞,等. SEBS 与  $\beta$ -NAs 对 PP 的协同增韧作用及增韧机理研究[J].材料导报,2024,38(12).
- [2]杨冰,王伟,迟卫瀚,等. 官能团化 SEBS 对 PP/SEBS 共混体系性能的影响[J].沈阳化工大学学报,2023,37(6).
- [3]付栋梁,徐杰,钟进福,等. 低密度聚乙烯/热塑性弹性体的共混改性及其发泡性能[J].弹性体,2022,32(1).
- [4]冯陈泽芳,危学兵,韩启明,等. TPE 材料配方对其与 PP 骨架包覆性能影响研究[J].塑料工业,2017,45(3).