

高透明高抗冲 PCTG 合金的制备与增韧机理研究

蒋红亮

浙江合复新材料科技有限公司 浙江 杭州 310000

【摘要】 PCTG 作为非晶态共聚酯，因透明性、耐化学性和加工流动性优异，在包装、医疗器械等领域应用前景广阔。但纯 PCTG 冲击韧性低，在受力或低温时易脆性断裂，限制了其在高抗冲场景的应用。本文结合高分子材料共混改性理论与微观结构表征技术，系统研究高透明高抗冲 PCTG 合金的制备工艺与增韧机理。重点探究增韧剂类型、含量及界面相容性对合金透明性与抗冲性能的协同调控规律，以及增韧剂相关状态与宏观力学性能的关联。通过优化选型与工艺，构建“核-壳结构增韧剂-PCTG 基体”微观复合体系，实现冲击强度与透明性同步提升。选用 MBS 为增韧剂，添加 15wt% 时，合金简支梁缺口冲击强度提升 210%，透光率超 88%，雾度低于 3%，其增韧机理也得到揭示。

【关键词】 PCTG 合金；高透明；高抗冲；增韧机理；共混改性；核-壳结构

DOI:10.12417/2705-0998.25.21.034

1 引言

PCTG 兼具非晶态聚合物高透明性与结晶性聚酯耐化学性，透光率超 90%，耐候性与加工稳定性佳。但在消费电子等领域，纯 PCTG 常温冲击强度低、低温易脆断，难满足高抗冲需求。当前其改性研究聚焦单一性能，存在“抗冲提升与透明下降”矛盾，传统弹性体增韧剂与基体相容性差致透光率降低，高相容性增韧剂增韧效率不足，且增韧机理研究多宏观，微观分析不足。为此，探索适配增韧体系、揭示机理意义重大。

2 PCTG 合金制备的理论基础

2.1 PCTG 的结构特性与性能短板

CTG 以对苯二甲酸酯链段和 1,4-环己烷二甲醇链段为核心，乙二醇链段引入形成完全非晶态结构。从分子链运动特性看，其玻璃化转变温度约 80-90℃，常温下分子链段运动能力弱，且分子间作用力强，加剧脆性。力学上，纯 PCTG 刚性好但冲击强度低，低温时更易脆断。透明性是其优势，透光率超 90%、雾度低于 2%。不过共混改性时，增韧剂与基体在折射率、分散及界面相容性方面的问题会影响透明性，制备合金需平衡抗冲与透明性，解决关键问题。

2.2 高分子合金增韧的核心理论

PCTG 合金的增韧改性基于高分子共混增韧理论，涵盖弹性体、刚性粒子、核-壳结构三类增韧机制，通过微观结构调控提升宏观性能。弹性体增韧是常见方式，将弹性体粒子分散于刚性聚合物基体，受冲击时，粒子作为应力集中点诱发基体产生银纹或剪切带，自身形变吸收能量。其关键在于界面相容性，差则易团聚，强则增韧效率降低。刚性粒子增韧是在基体引入刚性无机或有机粒子，利用模量差异促使基体剪切屈服并阻碍裂纹扩展，对粒子尺寸和分散性要求高，通常需纳米级且表面改性。核-壳结构增韧结合二者优点，增韧剂粒子由弹性内核与刚性外壳构成，外壳改善分散、保障界面结合，内核吸收能量，还能减少光线散射，是兼顾透明性与抗冲性能的理想方案。

2.3 增韧剂选型的关键原则

适配 PCTG 合金的增韧剂，需遵循相容性、透明性、增韧效率三大原则，从化学结构、物理形态和界面特性与基体协同。化学结构上，增韧剂分子链含与 PCTG 相似官能团或极性 segment 能增强界面结合，像含酯基等的增韧剂与 PCTG 相容性佳。物理形态上，增韧剂折射率要接近 PCTG，粒子尺寸小于可见光波长，核-壳结构增韧剂可调控外壳折射率，粒径控制在 50-200nm。增韧效率方面，增韧剂要有弹性与形变能力，弹性内核 T_g 低于使用温，含量 10-20wt% 为宜。

3 高透明高抗冲 PCTG 合金的制备工艺

3.1 原材料选型与预处理

PCTG 合金制备的核心原材料包括 PCTG 基体树脂、增韧剂和界面相容剂，各组分选型与预处理对合金性能影响显著。PCTG 基体树脂选用特性粘度 0.7-0.9dL/g 的共聚酯，如伊士曼 TX1001，其分子链长度适中，兼具加工流动性与力学性能，非晶态结构稳定，透光率超 91%，雾度低于 1.5%，能为合金透明性提供保障。预处理需在 80-90℃ 下真空干燥 4-6 小时，使水分含量降至 0.02wt% 以下，防止熔融共混时分子链水解断裂。增韧剂对比选用核-壳结构的 MBS 与 EMA，MBS 兼具增韧与透明性，EMA 与 PCTG 相容性好但改性效果待验证，二者预处理均采用热风干燥去除表面水分与杂质。界面相容剂选用 SMA，可促进增韧剂分散，添加量控制在 2-3wt%，预处理与 PCTG 树脂混合干燥。

3.2 共混制备工艺优化

PCTG 合金采用双螺杆挤出机共混挤出成型，通过优化核心工艺参数，实现各组分均匀分散与界面结合。螺杆组合采用四段式结构，混合段设置反向螺纹与捏合块增强剪切作用，反向螺纹产生局部高压促使熔体反复剪切混合，捏合块错列排布，剪切间隙 0.5-1.0mm，确保增韧剂粒子破碎分散、避免团聚。加工温度梯度升温，料筒各区温度 180-240℃ 不等，机头

220-225°C，既保证充分熔融，又避免分子链降解，还能控制MBS壳层软化状态。螺杆转速200-250r/min，过低剪切不足，过高易使熔体温度超250°C致材料降解。喂料速率依螺杆直径设为20-30kg/h，使熔体停留3-5分钟，保证混合且避免热老化。挤出熔体经水冷定型、切粒，粒子干燥2小时后再注塑成型，制备测试样条。

3.3 成型工艺对性能的影响

注塑成型工艺要匹配PCTG合金特性，通过优化参数减少缺陷，保障透明性与力学性能。注塑温度采用梯度设置，料筒190-230°C，喷嘴225-230°C，模具温度控制在60-70°C。温度过低，熔体冷却快、分子链取向度增加，易产生内应力，降低冲击韧性与透明性；温度过高，冷却时间长，降低效率且制品表面易出缩痕。注塑压力80-100MPa，注射速度分两段，充模初期低速，后期高速。保压压力为注塑压力的60%-70%，时间10-15s，过高或过长易使制品内应力增大。冷却速度采用缓冷，冷却时间依制品厚度设为20-25s，水温20-25°C。成型后样条需退火处理，在80-90°C保温1-2小时，缓慢冷却至室温，可消除60%以上内应力，提升冲击强度10%-15%，降低雾度0.5%-1%。

4 PCTG合金的增韧机理分析

4.1 增韧剂分散形态与界面结合

增韧剂在PCTG基体中的分散与界面结合状态，是决定增韧效率与透明性的关键。通过SEM与TEM观察，MBS增韧剂在PCTG中呈均匀分散的球状粒子，粒径120-160nm，无明显团聚，粒子间距500-800nm，形成“均匀分散-适度间距”结构，受力时可形成连续应力集中区，且避免光散射叠加。高分辨率TEM显示，MBS核-壳结构完整，PMMA外壳与PCTG界面无明显空隙，因酯基间范德华力及SMA相容剂的化学键合作用，界面相容性好。而EMA在PCTG中呈不规则条状分散，尺寸差异大且部分团聚，界面有空隙，导致透光率低5%-8%，雾度高2%-3%，增韧效率仅为MBS的60%。可见，核-壳结构增韧剂的刚性外壳能改善分散性与界面相容性，是协同提升透明性与抗冲性能的关键。

4.2 应力作用下的微观形变机制

通过冲击断口形貌与动态力学分析，揭示了PCTG合金在冲击应力下的微观形变机制及增韧剂诱导的能量耗散路径。纯PCTG冲击断口平整光滑，呈脆性断裂，分子链无法滑移分散应力。而MBS/PCTG合金冲击断口粗糙凹凸，有大量5-10μm长、1-2μm宽的银纹和与受力方向呈45°角的剪切带。MBS粒子作为应力集中点，冲击时诱发银纹生成，其弹性形变促使剪切带形成，扩展过程消耗大量能量，提升冲击强度。DMA分析表明，MBS/PCTG合金在-70°C附近现MBS弹性内核玻璃化转变峰，常温下内核高弹态可吸收能量；随MBS含量增加，

损耗因子峰值强度升高，15wt%时较纯PCTG提升40%，能量耗散能力增强。且适量MBS不影响基体刚性，实现“增韧不损刚”。

4.3 透明性保留的微观机制

PCTG合金透明性的保留，依赖增韧剂与基体在折射率匹配、分散均匀性及界面相容性上的协同。MBS增韧剂折射率与PCTG基体差值仅0.01，远低于临界差值，光线在相界面处折射与反射微弱。且MBS粒子粒径远小于可见光波长，依瑞利散射理论，小粒径粒子光散射可忽略，合金透光率保持在88%以上。SAXS分析表明，MBS粒子在基体中分散均匀，无团聚，界面相容性改善进一步抑制光散射，PMMA外壳与基体形成约5-10nm的连续过渡层，消除界面空隙。对比发现，MBS添加量15wt%时，兼顾抗冲与透明性；超过20wt%会出现轻微团聚，透光率下降、雾度升高，所以15wt%为最优添加量。

5 性能表征与机理验证

5.1 宏观性能表征结果

通过力学、透明性及耐化学性测试综合评价PCTG合金宏观性能，发现增韧剂类型与含量对其调控作用显著。力学性能上，MBS增韧效果优于EMA。MBS添加量15wt%时，PCTG合金简支梁缺口冲击强度达7.5kJ/m²，较纯PCTG提升210%，拉伸强度保持52MPa，弯曲模量2050MPa，刚性损失不足5%；低温下，-20°C时冲击强度仍达4.2kJ/m²，提升280%，改善低温脆性。透明性方面，MBS/PCTG合金透光率随MBS含量增加缓慢下降，添加15wt%时透光率88.5%，雾度2.7%，满足高透明需求，优于EMA体系。耐化学性测试显示，MBS/PCTG合金在50%乙醇、10%乙酸溶液中浸泡72小时后，冲击强度保持率超90%，透光率变化小于2%，耐化学性未受削弱，适用于化学接触场景。

5.2 增韧机理的验证

通过对比不同增韧体系，验证了MBS对PCTG的“核-壳结构诱导银纹-剪切带+弹性内核能量吸收”协同增韧机理。首先，对比无壳层PB弹性体与MBS增韧效果，PB添加15wt%时，PCTG合金冲击强度仅4.3kJ/m²，透光率降至78%，雾度6.5%，这表明PMMA壳层对增韧与透明协同至关重要，无壳层时弹性体团聚，无法有效诱发银纹，相分离还导致光散射；而MBS的PMMA壳层改善了分散与界面结合。其次，改变MBS核壳比例，当核壳比从7:3调为5:5，15wt%添加量下合金冲击强度降22%，说明弹性内核形变能量吸收是增韧重要部分。最后，界面相容剂用量优化实验显示，SMA添加量增加，合金冲击强度和透光率上升，证明界面相容性改善可促进银纹扩展、减少光散射。

5.3 工艺-结构-性能的关联

PCTG合金的制备工艺通过调控微观结构影响宏观性能，

形成“工艺-结构-性能”的内在关联。螺杆转速过低时，剪切作用不足，MBS 粒子分散不均，出现局部团聚，冲击强度降至 6.2kJ/m^2 ，透光率降至 85%；螺杆转速过高时，剪切热过大，MBS 壳层部分降解，核-壳结构破坏，冲击强度降至 6.5kJ/m^2 ，透光率因降解产物略有下降，因此 200-250r/min 是兼顾分散与结构完整性的最优转速。

模具温度过低时，熔体冷却过快，分子链取向度增加，内应力增大，冲击强度降至 6.8kJ/m^2 ，且内应力导致透光率波动；模具温度过高时，制品冷却时间延长，表面出现轻微缩痕，雾度升至 3.2%，因此 60-70°C 模具温度可平衡内应力与成型效率。增韧剂预处理不充分时，共混过程中产生气泡，冲击强度降至 7.0kJ/m^2 ，透光率因气泡散射降至 86%，表明原材料预处理是保障性能稳定的基础。

6 研究结论与展望

6.1 研究结论

本文结合共混改性理论与微观结构分析，系统探究了高透明高抗冲 PCTG 合金的制备与增韧机理，得出以下主要结论：

其一，PCTG 合金透明性与抗冲性能的协同提升，依赖核-壳结构增韧剂的精准调控。选用 MBS 作增韧剂，其 PMMA 壳层与 PCTG 基体相容性好，能均匀分散，弹性内核可吸收冲击

能量，且外壳与基体折射率匹配，避免光散射，解决了“抗冲-透明”的矛盾。

其二，MBS 对 PCTG 的增韧机理为“应力集中诱导银纹-剪切带+弹性内核能量吸收”。

其三，制备工艺影响性能，双螺杆挤出转速 200-250r/min、模具温度 60-70°C、原材料干燥至水分<0.02wt%，可实现性能最优平衡，且耐化学性良好。

6.2 研究展望

本文研究成果为 PCTG 合金高性能化改性提供了理论支撑，但也存在不足与改进方向：

一是增韧剂创新，现有 MBS 增韧剂耐温性有限，长期使用温度低于 100°C，未来可研发耐高温核-壳增韧剂，以耐高温弹性体为核、耐高温聚合物为壳，提升合金耐热性，拓展其在汽车内饰、灯具等高温场景的应用。

二是多性能协同优化，现有研究多聚焦透明与抗冲，未来可引入纳米增强粒子，构建复合体系，在保留透明抗冲性能的同时提升刚性与耐热性，实现多性能协同。

三是机理研究深化，现有增韧机理基于宏观与介观分析，未来可通过分子模拟揭示界面分子作用细节，建立更精准的模型指导分子设计。

参考文献：

- [1] 宋景奕.DBD 低温大气等离子体增强 PCTG 表面镀纳米 CO_2 涂层的研究[D].江西:南昌大学,2023.
- [2] 郭少华,罗国君,牛艳华,等.高强超韧聚对苯二甲酸丁二醇酯/共聚酯合金的制备[J].高分子学报,2022,53(12).
- [3] 钟毅文,麦堪成,李皓,等.PC/PCTG 合金的增韧研究[J].塑料工业,2019,47(6).
- [4] 刘瑞华,白春英,齐霞.共聚酯的合成及应用研究进展[J].合成树脂及塑料,2022,39(4).