

· 研究论文 ·

聚苯乙烯/聚苯醚/聚丙烯共混物的形态调控及其超临界 CO₂ 发泡性能研究

曾佳^{1,2} 何家欢^{1,2} 齐力伟¹ 刘缓缓^{1,2} 吴加俊^{1,2} 朱民^{1,2} 倪忠斌¹ 施冬健¹ 陈明清^{1*}

(¹江南大学化学与材料工程学院 无锡 214122)

(²无锡会通轻质材料股份有限公司 无锡 214101)

摘要 在国家双碳与轻量化战略推动下,聚苯乙烯/聚苯醚(PS/PPO)共混体系因其轻质和高性能特性成为发泡材料研究热点,但由于PS/PPO分子链刚性强,在发泡过程中熔体黏度大、流动性差,导致发泡剂在PS/PPO熔体中难以均匀分散,影响发泡效果.本工作通过熔融共混法在PS/PPO中引入聚丙烯(PP),研究了不同PP含量下,PP在PS/PPO共混材料中的分布情况及共混体系流变性能,并结合超临界CO₂釜式发泡技术,对PS/PPO/PP共混材料进行发泡.通过扫描电镜观察了发泡颗粒内部的泡孔结构、泡孔密度及发泡倍率.流变测试结果表明,PP加入基体后,改变了基体低频时的储能模量和复数黏度.同时不同含量的PP在基体中的分散结构显著影响了PS/PPO共混材料中PP的结晶状态及发泡效果.当PP用量为15%时,泡孔孔径最小为38 μm,泡孔密度最高为3.6×10⁷个/cm³,发泡倍率达7.6倍.本工作构建的柔性-刚性两相复合结构提升了材料的发泡稳定性,为高性能工程塑料发泡提供了新途径.

关键词 聚苯乙烯;聚苯醚;聚丙烯;形态调控;发泡性能

引用: 曾佳,何家欢,齐力伟,刘缓缓,吴加俊,朱民,倪忠斌,施冬健,陈明清.聚苯乙烯/聚苯醚/聚丙烯共混物的形态调控及其超临界CO₂发泡性能研究.高分子学报,doi: 10.11777/j.issn1000-3304.2026.25307.

Citation: Zeng, J.; He, J. H.; Qi, L. W.; Liu, H. H.; Wu, J. J.; Zhu, M.; Ni, Z. B.; Shi, D. J.; Chen, M. Q. Studies on morphology control of polystyrene/polyphenylene ether/polypropylene blends and their supercritical CO₂ foaming performance. *Acta Polymerica Sinica* (in Chinese), doi: 10.11777/j.issn1000-3304.2026.25307.

在国家双碳战略和轻量化战略的持续推进下,塑料泡沫产品受到越来越多的关注,其在日常生活中的应用也越来越广^[1,2].常用的发泡材料有聚氨酯(PU)、聚丙烯(PP)、聚乙烯(PE)、聚苯乙烯(PS)泡沫等^[3],其中发泡聚苯乙烯(EPS)因其低成本、易加工性和良好的绝缘性能等优异性能占据市场主导地位.然而,传统的EPS发泡工艺中使用戊烷发泡,不仅对环境产生污染^[4],其PS泡沫制品在性能上也存在局限,耐热性和机械强度较低,难以满足日益提升的市场需求.聚苯醚(PPO)^[5]具有刚性大、耐热性高、难燃、强度较高、

电性能优良等优点,且其比重仅为1.06 g/cm³,是五大工程塑料中密度最低的,有助于实现产品轻量化.但PPO的熔融流动性差,加工成型较困难,实际应用中常与PS进行共混改性后再发泡.聚苯乙烯/聚苯醚(PS/PPO)共混材料可结合PS良好的加工性能和PPO优异的机械性能、耐热性与阻燃性等优点,对其进行发泡不仅能实现材料的轻量化,还能大幅提升发泡材料的强度以及耐热性等性能^[6,7],拓展其在电子电器、汽车制造等行业的应用.但是PS和PPO在化学结构和极性上存在一定差异,从热力学角度看,二者共混

2025-11-22收稿,2026-01-26录用, 网络出版.

基金项目:

* 通信联系人, E-mail: mqchen@jiangnan.edu.cn

doi: 10.11777/j.issn1000-3304.2026.25307; CSTR: 32057.14.GFZXB.2026.7559

属于部分相容体系. 因此, 进一步改善 PS/PPO 共混体系的相容性及性能, 以满足更多样化的需求具有重要意义. 为提高 PS 和 PPO 的相容性, 国内外学者通过加入苯乙烯/乙烯/丁烯/苯乙烯嵌段共聚物 (SEBS)^[8]、聚丁烯^[9]、聚四氟乙烯 (PTFE)^[10]、石墨烯和纳米二氧化硅^[11]等相容剂、增韧剂或改性剂调控复合材料的微观结构和综合性能, 取得了较好的效果.

超临界 CO₂ 发泡技术以 CO₂ 作为发泡剂, 具有绿色环保、降低碳排放的显著优势. 通过改变超临界 CO₂ 的压力、温度、浓度以及聚合物的种类、分子量等参数, 可实现发泡材料的泡孔结构与宏观性能的精确调控^[12,13], 所制备的发泡材料兼具有泡孔尺寸小、分布均匀、泡孔密度高等优点, 可广泛应用于塑料、橡胶等高分子材料的发泡成型领域. 在 PS/PPO 共混发泡体系中, 超临界 CO₂ 的模压发泡、挤出发泡技术已成为行业的研究热点, 但在釜压发泡工艺中的应用研究却较少, 现有工艺尚不成熟, 难以制备出泡孔均匀、综合性能优异的发泡珠粒. 这一现象的本质在于 PS/PPO 共混物的分子链刚性较强, 发泡过程中熔体黏度高、流动性差, 不仅导致超临界 CO₂ 在熔体中难以均匀扩散与溶解, 还会造成泡孔成核与生长过程失控, 最终影响材料的结构均一性与性能稳定性. 此外, 通过添加增塑剂、相容剂可实现均相发泡, 并形成单相结构, 但也易出现泡孔破裂、合并等问题, 导致材料的结构稳定性和力学强度仍有待进一步提升^[14].

在前期的研究中, 本课题组利用 PTFE 形成高比表面积的纤维状结构增强了对 CO₂ 的吸附作用, 从而解决了 PS/PPO 共混体系在超临界 CO₂ 发泡技术时面临的泡孔结构难以控制、发泡倍率低等关键问题. 为解决高强度工程塑料 PS/PPO 单相发泡泡孔稳定性差、综合性能调控受限的核心难点, 需通过共混发泡体系的相态设计优化泡孔结构, 提升材料的发泡性能. 因此, 本工作在前期研究的基础上, 通过超临界 CO₂ 釜式发泡技术, 将 PP 通过熔融共混引入至 PS/PPO 复合材料中, 利用柔性/刚性两相间的不相容特性构建 PP 为内壳, PS/PPO 为外壳的海-岛结构, 既增强材料的气密性, 又能进一步提升 PP 相与 PS/PPO 相间的相容性, 最终提升发泡性能. 通过研究其内部相分散、抗冲击性能、流变性能, 发泡性能系

统地探讨 PP 用量以及加工流程对共混体系内部相分布以及发泡性能的影响, 本研究将为高强度工程材料在发泡领域的高性能化开发应用提供新的技术思路与理论支撑.

1 实验部分

1.1 主要原料

PS: PG-33(2), 镇江奇美化工有限公司; PPO: LXN035, 南通星辰合成材料有限公司; PTFE: 工业级, 南京天诗新材料有限公司; PP: FL7540L, The Polyolefin Company; CO₂: 工业级, 林德二氧化碳有限公司.

1.2 主要设备及仪器

扫描电子显微镜 (SEM): S-4800, 日本日立公司; 摆锤式冲击试验机: MZ-2056, 江都市明珠试验机械厂; 旋转流变仪: MCR302e, 奥地利安东帕公司; 高压间歇发泡釜: GYF-201, 南通华兴高压釜有限公司; 小型双螺杆挤出机: AK22, 南京科亚化工成套装备有限公司; 平板硫化仪: KY-3201, 东莞开研机械设备有限公司; X 射线衍射仪: D8 Advance, 德国布鲁克 AXS 有限公司.

1.3 样品制备

PS/PPO 与 PP 共混体系的制备. 首先将 PS、PPO、PP 置于电热鼓风干燥箱中 80 °C 烘干 8 h 去除水分. 将烘干的 PS、PPO、PTFE、PP 材料按照表 1 进行配比, 在高速搅拌机中搅拌 30 min; 进而利用双螺杆挤出机进行熔融共混, 经水下拉丝高速切粒机造粒, 制得发泡预制颗粒. 其中双螺杆挤出机温度区间分别为 190、210、220、230、230、220、200 °C, 主螺杆转速为 180 r/min, 喂料速度为 30 r/min, 切粒速度为 750 r/min.

为更好的考察 PS/PPO 与 PP 共混体系中 PP 相和 PS/PPO 的结构, 确保其不受双螺杆挤出机

Table 1 The weight ratios of PS/PPO and PP blended materials.

Sample serial number	Mass fraction (wt%)			
	PS	PPO	PTFE	PP
1	89.8	10	0.2	0
2	84.8	10	0.2	5
3	79.8	10	0.2	10
4	74.8	10	0.2	15
5	69.8	10	0.2	20

挤出过程的影响,用热压方式制备了PS/PPO与PP共混体系片材.将共混材料放入10 cm(长)×10 cm(宽)×1 mm(厚)的模具中,将压片机预热至220 °C,保压10 min后取出模具,脱模取出样片.将部分样片切割成无缺口样条,同时将部分样片剪碎制成样品颗粒(模拟造粒).

发泡样品的制备:首先在高压发泡釜中通入少量CO₂排出釜内空气,然后取上述制备的材料300 g置于发泡釜中,同时加入10 L水,再加入少量高岭土防止发泡颗粒粘结,关闭阀门.在发泡釜中通入超临界CO₂,并按照前期的探索研究结果,控制在温度为150 °C,压力为3.6 MPa的条件下发泡,并保压时间10 min后打开发泡釜出口,获得发泡颗粒.

1.4 性能测试与结构表征

1.4.1 冲击测试

使用冲击试验机参照GB/T 1043.1—2008标准《塑料简支梁冲击性能的测定》进行冲击测试.

1.4.2 流变性能测试

使用旋转流变仪对样品的动态剪切流变性能进行测试.首先使用压片机将样品压片处理,裁剪取得直径25 mm,厚度为1 mm的圆片试样,将试样放于平行板夹具间,测试温度为220 °C,剪切频率范围为0.1~100 Hz,最大应变应力为5%.

1.4.3 发泡倍率

发泡前样品的密度 a (g/cm³)与发泡后密度 b (g/cm³)的比值为发泡倍率 φ ,如式(1).

$$\varphi = \frac{a}{b} \quad (1)$$

1.4.4 泡孔参数

使用Image-Pro Plus软件对泡孔的尺寸进行统计,计算得到平均尺寸并得到单位面积上的泡孔数,泡孔密度由式(2)计算得到.

$$n = \left[\frac{\alpha}{L^2} \right]^{\frac{3}{2}} \times \varphi \quad (2)$$

式中: n :泡孔密度,个/cm³; α :统计面积中的泡孔数量,个; L :统计面积中的边长,cm.

1.4.5 X射线衍射仪测试

将样品用粉碎机粉碎成粉末状,置于样品台上铺平.Cu靶($\lambda=0.154$ nm),扫描范围:10°~50°,扫描速度:5 °/min.

1.4.6 SEM观察

将样片液氮脆断,使用刀具切割发泡颗粒,将脆断及切割后的样品放置于导电胶上,对样品进行喷金处理.再使用扫描电镜观察样品相界面及泡孔结构.

2 结果与讨论

2.1 不同用量PP在PS/PPO/PP共混体系中的分散状态

为探究不同用量PP在PS/PPO/PP共混基材中的分散状态,对热压后的共混物进行扫描电镜表征,结果如图1(a)~1(e)所示.从图1(a)可以看出,当没有添加PP时,PS和PPO混合物较均

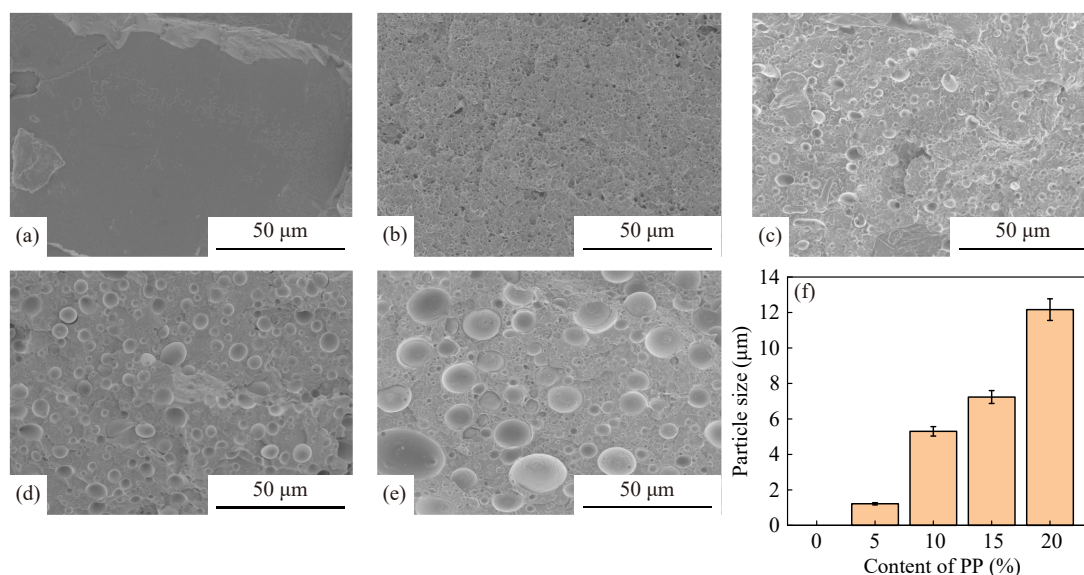


Fig. 1 Dispersion states of PP in PS/PPO/PP blends at different PP contents: (a) 0%; (b) 5%; (c) 10%; (d) 15%; (e) 20%. (f) Particle size of PP in PS/PPO blends at different PP contents.

一, 无清晰界面轮廓. 随着PP的加入, 共混物中出现了很多小颗粒(图1(b)), 而且随着PP用量的增加, PP在PS/PPO共混基材中的分散相颗粒直径逐渐增加(图1(c)~1(e)). 图1(f)为不同用量PP在PS/PPO共混基材中的平均粒径. 由于在PS/PPO/PP共混体系中, PS/PPO为连续相, PP为分散相. 当PP加量为5%时, PS/PPO基体有足够空间包裹分散的PP颗粒, 界面作用使PP均匀分散, 此时分散相粒径仅为1 μm . 但随着PP加量增加至20%, 体系中PP用量较高导致共混过程中颗粒间碰撞团聚的概率显著增加. 同时, PP表面与PS/PPO基体的界面结合力不足, 难以维持小粒径分散状态, 颗粒倾向于聚集以降低表面能, 进一步促使粒径增大至12 μm .

2.2 不同PP用量对PS/PPO/PP共混体系流变性能和熔融指数的影响

图2(a)~2(c)分别为不同PP用量的情况下, PS/PPO/PP复合体系的储能模量、复数黏度和损耗因子随角频率的变化情况. 由图可知, 在PS/PPO基体中加入PP后, 在低频时PP的加入可提高材料弹性模量及复数黏度, 而显著降低损耗因子; 而在高频时, PP的加入及其用量变化都对材料的流变性能影响不明显, 这主要与高分子材料的黏弹性行为和相结构有关. 低频下外力作用时间较长, 高分子链段有足够时间发生运动, 此时主要考察材料的黏流态. PP以粒子状态存在于PS连续相中, 低频时PP相通过阻碍基体变形提升模量, 提升材料的弹性响应. 高频时的外力变化极快, 由于PP的松弛时间远长于高频测试的时间尺度, 其链段运动未被激发, 分子链段来不及响应, 因而模量变化主要取决于PS/PPO基体的刚性, 添加PP的额外增强效果有限. 釜式发泡时, 降压速率一般为3~5 MPa/s, 泡孔生长阶段的时间远长于成核阶段, 且与流变测试低频段对应的长松弛时间匹配. 低频时较高的弹性模量可抑制泡孔破裂; 较高的复数黏度可以延长泡孔的生长时间, 减少 CO_2 的逃逸速度; 而低损耗因子表明熔体的弹性占主导, 更适合发泡. 因此PP加入PS/PPO基体后, 对发泡材料的泡孔生长过程起到优化作用.

图3(a)为不同PP用量的PS/PPO/PP共混体系的熔体流动速率(MFR). 从图中可以看出, 随PP用量的增加, PS/PPO/PP共混体系熔体流动速率

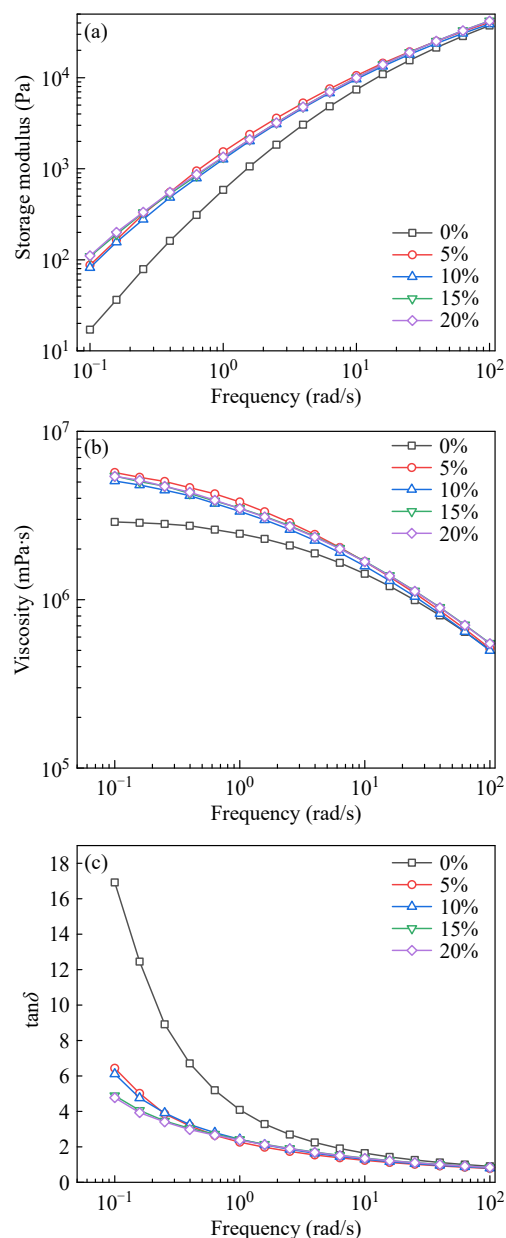


Fig. 2 Rheological properties (a-c) of PS/PPO/PP blends with different PP contents.

从21.2 g/10min上升至59.6 g/10min. 这是由于在PS/PPO/PP共混体系中, PP作为分散相, 以粒子的形式分散在基体中, 分散的PP粒子会打破PS/PPO基体分子链的规整缠结, 降低流动阻力; 此外, 随PP用量的提高, 粒子的分布密度和粒径增加, 基体占比减少, 共同降低体系整体黏度, 使PS/PPO/PP共混体系的熔体流动速率随PP用量增加而显著提高. 图3(b)为不同PP用量的PS/PPO/PP共混体系的抗冲击性能. 从图中可以看出, 随着PP用量从0%增至20%, PS/PPO/PP共混体系的抗冲击强度从6.3 kJ/m^2 持续下降至

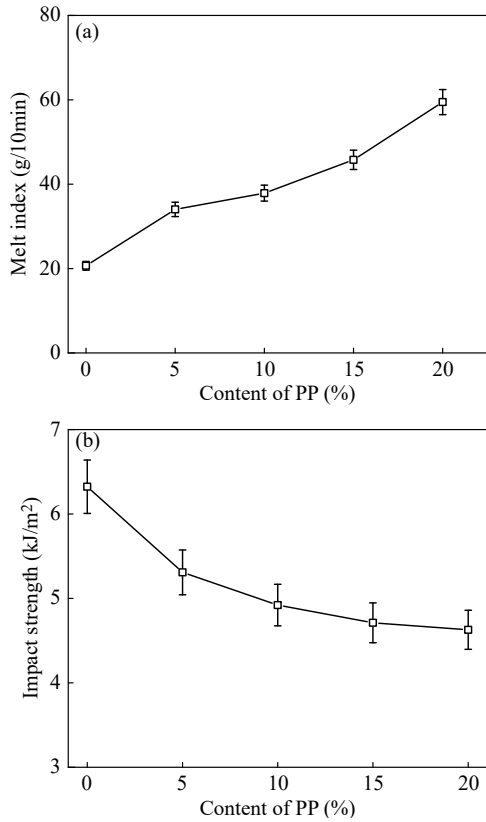


Fig. 3 Melt index (a) and impact strength (b) of PS/PPO/PP blends with different PP contents.

4.6 kJ/m². 这是由于PP与PS/PPO基体相容性差, 添加PP后形成明显的两相结构, 且两相界面结合力弱. 在受冲击时两相界面处成为应力集中点, 会加速裂纹扩展, 降低材料整体抗冲击能力. 同时, 随PP用量增加, PP在PS/PPO基体中分散均匀性下降, 易形成孔洞、缝隙等缺陷. 这些缺陷成为应力薄弱点, 导致材料抗冲击性能下降.

在挤出加工前, PP相以粒子的形式分散于PS/PPO基体中(如图1(b)~1(e)). 为考察PP相在加工过程中的状态, 用SEM观察其挤出加工后的相态分布, 如图4(a)~4(d)所示. 挤出加工后, PP分散状态从粒子变成长条状. 这是由于双螺杆挤出机在运行时, PP分子在高温下的热运动加剧, 分子间的相互作用力减弱, 使得PP粒子内部的分子更容易发生相对位移, 导致黏度降低. 当黏度降低时, PP粒子的流动性增加, 更容易受到剪切力和物料流动的影响而发生变形. 在挤出的过程中, PP粒子受到定向力的影响被逐渐拉长, 使相分散状态从球形向长条状转变. 此外, 螺杆旋转带来较强的剪切力可能使部分小颗粒受到周围物料流动的影响, 倾向于沿着流动方向连接成长条状, 并在后续的流动过程中重新聚集和排列. 当PP用量为5%时, PP相粒子极小, 挤出加工后, 大量粒子聚集形成长条状, 但由于PP用量较少, 分布较宽. 随着PP用量的增加, PP相分布越紧密, 数量越多. 由于PP与PS/PPO基体并不相容, 其拉伸变形机理主要与熔体流动速率分布有关, 如图4(e). 根据Hagen-Poiseuille定律, 挤出模头内熔体流速呈中心快、边缘慢的抛物线分布. 这主要是由于在物料挤出时, 挤出口产生强剪切力, 且壁面剪切力高, 流动中心较低. 而流速差异导致剪切速率梯度, 从而在熔体中产生横向应力差. 但是应力差的挤压作用并非直接的径向压缩, 而是通过壁面附近高应力区域对颗粒后端施加更大的黏性阻力, 而中心低应力区域对前端拖拽更快, 形成轴向拉力. 而PP在高温低黏

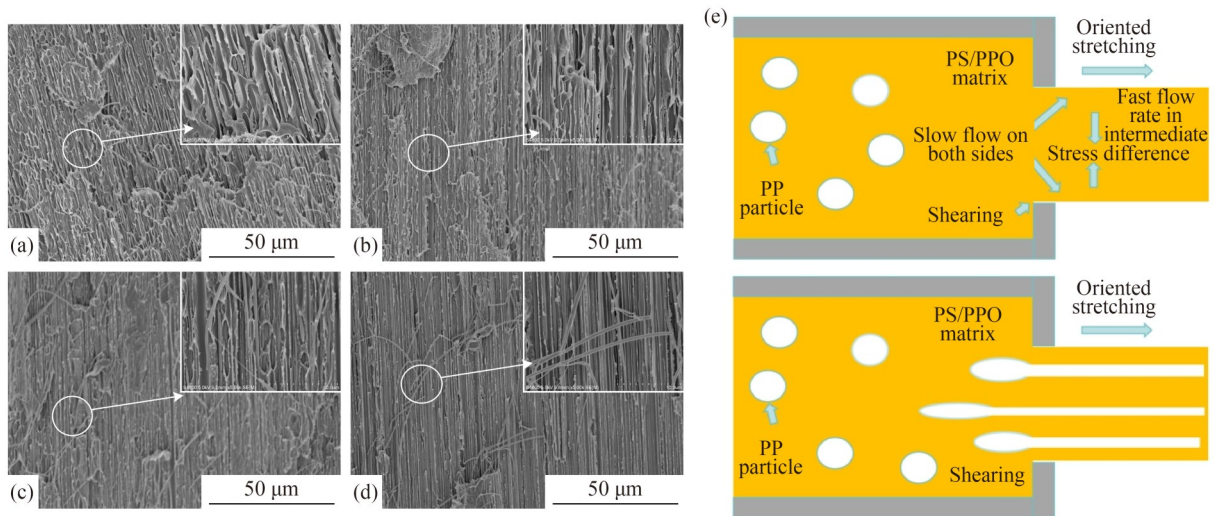


Fig. 4 Phase distribution patterns of PS/PPO/PP blends after extrusion processing with different PP contents: (a) 5%; (b) 10%; (c) 15%; (d) 20%; (e) Schematic diagram of PP deformation during extrusion processing.

度的特性下会随着 PS/PPO 基体沿拉力方向被拉长。

2.3 挤出加工对 PP 结晶情况的影响

图 5 为挤出加工前后 PS/PPO/PP 共混体系 (PP 的添加量为 15%) 的 X 射线衍射图, 其中, 其 α 晶型的结晶特征峰对应的主要位置为 14.1° 、 17.0° 、 18.5° 、 21.0° 。从图中可以看出, 在挤出加工后, 在 14.1° 、 17.0° 等处的峰消失, 代表挤出加工过程对 PP 的结晶结构造成破坏^[15,16]。这是由于在挤出过程中, 双螺杆挤出的强剪切应力直接破坏 PP 分子链的规整排列, 与高温协同作用, 加剧晶体熔融, 最终形成以无定形为主的结构。此外, 挤出后通过水冷快速冷却, 导致 PP 分子链难以重新结晶。PP 结晶对其发泡性能影响较大, 由于 CO_2 气体无法渗透结晶区, 会导致发泡性能下降。挤出加工后 PP 结晶区消失, 对后续发泡流程有利。

2.4 不同 PP 用量的 PS/PPO/PP 共混体系发泡颗粒及其泡孔结构

图 6 为不同 PP 用量的 PS/PPO/PP 共混体系发泡颗粒 SEM 及泡孔频数分布图。从图中可以看出, 当 PP 用量为 5% 时, 如图 6(b) 所示, 与未添加 PP 的 PS/PPO 样品对照相比 (如图 6(a) 所示), 泡孔平均孔径明显增加, 且泡孔的孔径分布较宽, 均一性较差, 材料的发泡效果较差。随着 PP 用量上升至 10%~15%, 如图 6(c) 和 6(d) 所示, 泡孔平均孔径减小, 其孔径分布较窄, 效果较好。

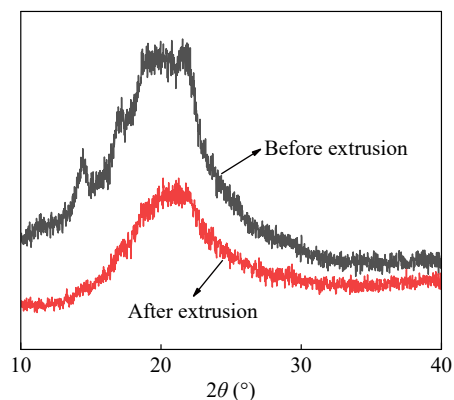


Fig. 5 XRD patterns of PS/PPO/PP blends before and after extrusion processing.

且随着 PP 用量的增加, 其平均孔径逐步低于空白对照, 此时材料发泡效果得到显著提升。当 PP 用量上升至 20%, 如图 6(e) 所示, 泡孔孔径增加, 且形状更加不规则, 其孔径分布广, 均一性极差。同时, 当 PP 用量超过 20% 后, 泡孔出现了明显的并泡痕迹, 说明该用量下材料的发泡性能不稳定。因此 PP 添加量应保持在 10%~15% 效果较好。

图 6(f) 给出了不同 PP 用量的 PS/PPO/PP 共混体系发泡颗粒直径。由图可知, 加入 5% 的 PP 后, 材料的泡孔孔径从 $54 \mu\text{m}$ 增加至 $88 \mu\text{m}$, 这是由于挤出加工后, 大量 PP 粒子聚集形成的条形 PP 相数量较少, 分布较散。发泡时, 在相同气体存量下, PP 加入量为 5% 时由于界面处形成的发泡位点较少, 泡孔密度从 1.9×10^7 个/ cm^3 下降

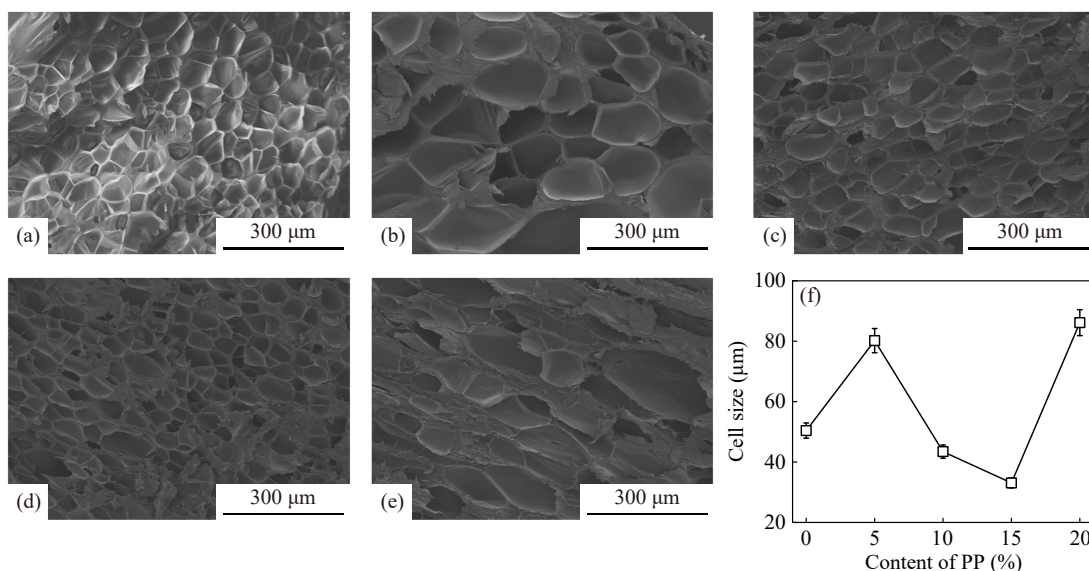


Fig. 6 SEM images (a-e) and sizes (f) of cells in PS/PPO/PP blends with different PP contents: (a) 0%; (b) 5%; (c) 10%; (d) 15%; (e) 20%.

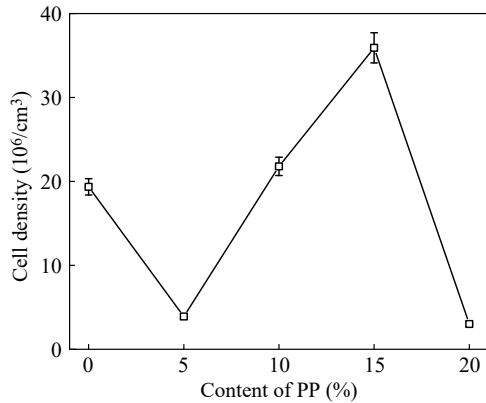


Fig. 7 Cell density of PS/PPO/PP blends with different PP contents.

至 4.0×10^6 个/cm³ (图7), 导致单个位点气体存量较高, 泡孔较大. 随着PP用量增加至15%, PP相数量增加, 成核位点增多, 泡孔孔径减小至 $38 \mu\text{m}$, 泡孔密度提升至 3.6×10^7 个/cm³. 随着PP用量增加至20%, PP相在PS/PPO基体中大量存在, 排列过于致密, 会导致材料发泡时泡孔与泡孔间的泡壁刚性不足, 造成大量的泡孔合并, 因此其泡孔孔径增加至约 $100 \mu\text{m}$, 泡孔密度下降至 3×10^6 个/cm³且泡孔形状较为不规则.

2.5 不同用量的PP对PS/PPO/PP共混体系发泡颗粒发泡倍率的影响

图8为不同PP用量的PS/PPO/PP共混体系发泡珠粒的发泡倍率. 从图中可以看出, 加入5%的PP后, 共混体系的发泡倍率从6.8倍下降至4.3倍. 这是由于PP用量少, 对CO₂气体的存储量相应降低. 当PP的用量上升至15%, 发泡倍率上升至7.6倍, 这是由于随着PP用量的增加, 共混体系对气体的总体储存能力提升, 发泡倍率提高. 当PP的用量达到20%, 此时发泡倍率反而下降

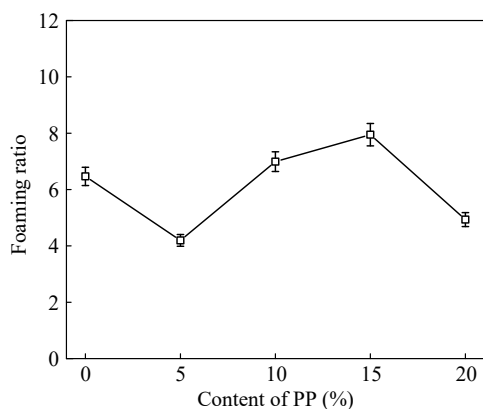


Fig. 8 Foaming ratio of PS/PPO/PP blends with different PP contents.

至4.5倍, 这是由于PP加量过多, 导致共混体系的熔体强度较低, 发泡时难以承受内部气体的快速膨胀, 导致大量气体逸散.

2.7 泡孔嵌套结构及其形成过程

为探究泡孔结构及其形成过程, 用SEM观察了PS/PPO/PP发泡材料的内部泡孔嵌套结构, 如图9(a)所示. 从图中可以看出, 在泡孔泡壁处有明显的两相界面存在, 证明发泡颗粒形成预想的嵌套结构, 形成泡孔内层为PP相, 外层为PS/PPO相. 因而, 在泡壁间为PS/PPO基体形成的泡沫珠粒的结构支撑层(红色箭头处), 内层为PP形成的气体封闭层. 在发泡过程中, 如图9(b)所示, CO₂气体首先在外部高压的环境下渗透进入PS/PPO基体中, 后逐步在基体与PP相的相界面中聚集. 随着CO₂气体在相界面处逐步积累, 气体在压力的作用下逐步渗透进入PP相. 由于PS/PPO基体对CO₂气体的亲和性较差且没有足够的气体密封性, 因此基体以及两相界面中的CO₂气体快速逸散. 在PP相中的气体由于PP是柔性链段, 具有较好气体密封性能; 因此在泄压时, 从PP相内部膨胀. 此时外层的PS/PPO由于分子链刚性较强, 可以在外层提供足够的熔体强度支撑气体膨胀带来的压力. 因此最终形成内层为PP薄膜, 外层为PS/PPO基体的嵌套泡孔结构. 相比于高强度工程塑料的单相发泡, 该方法直接采用两相结构, 避免了高强度工程塑料加入增塑剂、柔性材料以及相容剂后, 材料达到均一稳定需要

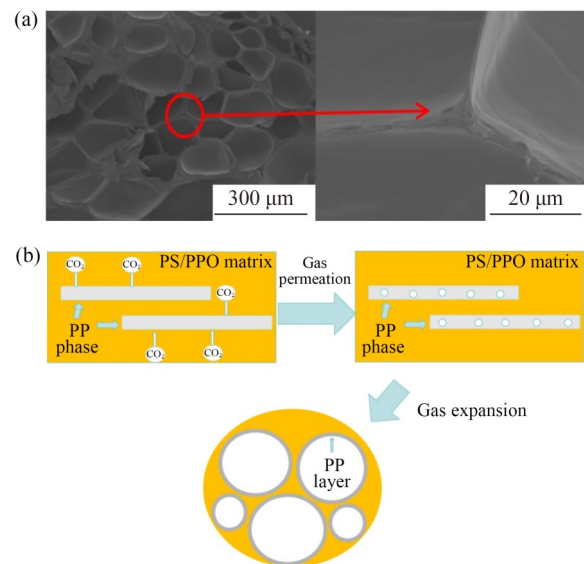


Fig. 9 (a) SEM images of hierarchical cell structure; (b) Schematic diagram of formation processing.

多次反复共混, 操作复杂, 成本较高的问题。

3 结论

(1) 随着PP加入量从0%增加至20%, PP在PS/PPO基体中的分散相粒径从1 μm 增至12 μm 。当PP用量超过10%时, 团聚现象显著, 界面结合力不足导致分散性下降。低频下, PP的加入显著提高储能模量和复数黏度, 降低损耗因子, 增强熔体弹性, 有利于抑制泡孔破裂和延长气体保留时间。因PP的加入破坏基体分子链缠结, 降低了流动阻力, 熔体流动速率随PP用量增加从21.2 g/10min升至59.6 g/10min。

(2) 挤出加工使PP分散相从粒子转变为长条状, 且随PP用量增加, 长条状结构更密集。这一变化源于剪切力作用下PP粒子的定向拉伸与聚集。挤出过程的高温 and 强剪切破坏PP的 α 晶型结构, 而快速冷却过程又使PP分子链难以再次形

成规整结构而最终形成无定形相, 消除结晶区对 CO_2 渗透的阻碍, 有利于后续发泡。

(3) 当PP的加入量为15%时, 泡孔孔径最小, 为38 μm ; 泡孔密度最高, 为 3.6×10^7 个/ cm^3 ; 发泡倍率达7.6倍。发泡过程中, CO_2 在PS/PPO基体与PP相界面聚集, 泄压时PP相因柔性链段提供气体密封, 外层PS/PPO基体提供结构支撑, 形成内层PP薄膜、外层PS/PPO的嵌套泡孔结构, 显著提升材料气密性。

本研究以低成本、柔性的PP为改性组分, 通过熔融共混在刚性PS/PPO中形成稳定海岛结构, 既降低了基体熔体黏度、改善加工流动性, 又利用PP分散相作为异相成核中心调控泡孔形貌。该方法可应用于两不相容体系的柔性-刚性材料共混体系, 尤其适用于分子链刚性较强、难以直接共混加工成为均一稳定结构的高强度工程塑料发泡。

REFERENCES

- 1 Martini, J.; Waldman, F.; Suh, N. P. The production and analysis of microcellular thermoplastic foams. *Annual Conference-Society of Plastics Engineers*, **1982**, 28, 674-676.
- 2 江俊杰, 刘华文, 田方伟, 陈晔焱, 翟文涛. 聚合物发泡与多孔功能材料的研究与应用进展. *科学通报*, **2024**, 69(20), 2964-2977.
- 3 Zhai, W. T.; Jiang, J. J.; Park, C. B. A review on physical foaming of thermoplastic and vulcanized elastomers. *Polym. Rev.*, **2022**, 62(1), 95-141.
- 4 Xu, Z. M.; Jiang, X. L.; Liu, T.; Hu, G. H.; Zhao, L.; Zhu, Z. N.; Yuan, W. K. Foaming of polypropylene with supercritical carbon dioxide. *J. Supercrit. Fluids*, **2007**, 41(2), 299-310.
- 5 Yan, H. K.; Sheng, H. N.; Hua, H. W.; Zhang, L.; Yao, Y. Y.; Bao, J. B. Effects of poly(propylene carbonate) on poly(butylene adipate-co-terephthalate) microcellular foams: improved expansion and reduced shrinkage. *Polym. Eng. Sci.*, **2025**, 65(3), 1462-1473.
- 6 Jiang, J. J.; Tian, F. W.; Zhou, M. N.; Li, M. Y.; Xiong, Z. J.; Gao, N.; Liu, H. W.; Zhai, W. T. Fabrication of lightweight polyphenylene oxide/high-impact polystyrene composite bead foam parts *via* in-mold foaming and molding technology. *Adv. Eng. Mater.*, **2022**, 24(3), 2101100.
- 7 Li, Z. L.; Tang, Y. J.; Wang, Y. Q.; Wang, X. D.; Chen, S. H. Ultrahigh compressive strength and heat resistance of polystyrene/polyphenylene oxide foams of supercritical carbon dioxide foaming. *J. Appl. Polym. Sci.*, **2024**, 141(9), e55014.
- 8 Tang, W. H.; Guo, X. J.; Li, D. P.; Zhu, E. W.; Yuan, H. L. Simultaneous toughening of PPO/HIPS/glass fiber reinforced composites with thermoplastic rubbers. *J. Appl. Polym. Sci.*, **2014**, 131(11), app.40299.
- 9 Guo, J. M.; Huang, H. M. Application of polybutene in modified polyphenylene ether. *China Plast Indust.*, **2009**, 37(S1), 7-9.
- 10 吴加俊, 曾佳, 刘缓缓, 朱明, 叶明, 郑广通, 倪忠斌, 陈明清. 釜式发泡制备ABS/PTFE珠粒及成型研究. *塑料工业*, **2023**, 51(01), 80-84+162.
- 11 Xiao, P.; Xiao, M.; Gong, K. C. Preparation of exfoliated graphite/polystyrene composite by polymerization-filling technique. *Polymer*, **2001**, 42(11), 4813-4816.
- 12 Jiang, X. L.; Zhao, L.; Feng, L. F.; Chen, C. P. Microcellular thermoplastic polyurethanes and their flexible properties prepared by mold foaming process with supercritical CO_2 . *J. Cell. Plast.*, **2019**, 55(6), 615-631.
- 13 Liu, H. M.; Wang, X. D.; Liu, C. T.; Mi, H. Y.; Wang, Y. Q.; Chen, S. H. Green strategy based on supercritical-fluid foaming for fabricating rigid microcellular thermoplastic polyimide foams with ultrahigh compressive strength. *Compos. Part B Eng.*, **2024**, 273, 111204.

- 14 翟文涛, 江俊杰. 热塑性弹性体超临界流体间歇发泡过程中的基本问题. 高分子学报, **2024**, 55(4), 369–395.
- 15 吴佳杰, 郭巍. PP/PE-HD 共混物的结晶行为和发泡性能. 工程塑料应用, **2022**, 50(08), 1–6.
- 16 Jiang, Y. X.; Wu, J. J.; Leng, J.; Cardon, L.; Zhang, J. Reinforced and toughened PP/PS composites prepared by Fused Filament Fabrication (FFF) with *in-situ* microfibril and shish-kebab structure. *Polymer*, **2020**, 186, 121971.

Research Article

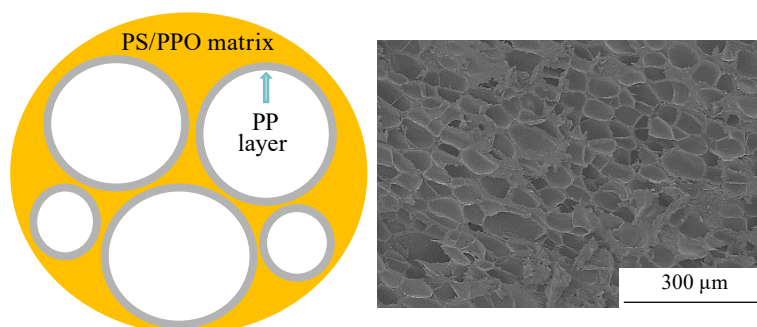
Studies on Morphology Control of Polystyrene/Polyphenylene Ether/ Polypropylene Blends and Their Supercritical CO₂ Foaming Performance

Jia Zeng^{1,2}, Jia-huan He^{1,2}, Li-wei Qi¹, Huan-huan Liu^{1,2}, Jia-jun Wu^{1,2}, Min Zhu^{1,2}, Zhong-bin Ni¹,
Dong-jian Shi¹, Ming-qing Chen^{1*}

(¹College of Chemical and Material Engineering, Jiangnan University, Wuxi 214122)

(²Wuxi Huitong Lightweight Materials Co., Ltd, Wuxi 214101)

Abstract With the development of the national dual-carbon and lightweight strategy, polystyrene/polypropylene (PS/PPO) blend systems have become a research hotspot for foamed materials owing to their lightweight and high performance. However, owing to the strong rigidity of the PS/PPO molecular chains, PS/PPO has a high melt viscosity and poor fluidity during the foaming process, making it difficult to disperse the foaming agent uniformly in the PS/PPO melt, which affects the foaming effect. To address these problems and the challenges of single-phase foaming of high-performance engineering plastics, a phase design for co-mingled foaming systems was employed. This approach optimizes the cell structure from a single phase to a composite structure of flexible and rigid immiscible phases, thereby enhancing the foaming performance of the material. Polystyrene/polyphenylene ether/polypropylene (PS/PPO/PP) blends were prepared using a melt blending method, and the distribution and rheological properties of PP in PS/PPO blends with different PP contents were studied. Using supercritical CO₂ as the foaming agent, the PS/PPO/PP blend was foamed by batch kettle foaming, and the cell structure, cell density, and foaming rate of the foamed particles were observed using scanning electron microscopy. The results show that the storage modulus and complex viscosity of the substrate at low frequencies changed when PP was added to the matrix. Simultaneously, the dispersion structure of PP with different contents in the matrix significantly affected the crystallization state and foaming effect of the PP/PPO blend and improved the foaming performance of the PS/PPO blend. When the amount of PP was 15%, the minimum pore size was 38 μm, the highest cell density was 3.6×10⁷ cells/cm³, and the foaming ratio was 7.6 times. This study constructs a flexible-rigid two-phase composite to enhance the foaming stability of the material, providing a new approach for foaming high-performance engineering plastics.



Keywords Polystyrene; Polyphenylene Ether; Polypropylene; Morphology control; Foaming property

* Corresponding author: Ming-qing Chen, E-mail: mqchen@jiangnan.edu.cn