

# 苯乙烯接枝改性对聚丙烯发泡质量的影响

魏自鹏<sup>1,2</sup>, 幸锦福<sup>1,2</sup>, 朱能贵<sup>2</sup>, 蒋团辉<sup>1,2</sup>, 龚维<sup>1\*</sup>

(1. 贵州大学材料与冶金学院, 贵州 贵阳 550025; 2. 国家复合改性聚合物材料工程技术研究中心, 贵州 贵阳 550022)

**摘要:** 聚丙烯(PP)的熔体强度对发泡质量有着极大影响,用简单的方法显著提高其熔体强度极为重要。研究以苯乙烯(St)作为接枝单体,采用熔融共混法制备高熔体强度聚丙烯(HMSPP),研究St单体对PP的熔体流动速率、流变性能、结晶和发泡质量的影响。结果表明:St单体接枝率越高,产物的熔体流动速率越低,加入St单体后熔体流动速率从103.6 g/10 min下降至83.4 g/10 min,St单体显著提高PP的熔体强度。此外,加入St单体后的产物具有更高的复数黏度和储能模量以及更小的损耗角。扫描电子显微镜结果表明,St单体可以显著改善PP发泡质量,St单体接枝率最高的HMSPP3在200 °C下仍具有泡孔形态良好、高均匀性和高密度的特性,泡孔密度从 $8.14 \times 10^6$  个/cm<sup>3</sup>增加至 $1.59 \times 10^7$  个/cm<sup>3</sup>,平均泡孔尺寸从80 μm下降至59 μm。与PP比较,接枝率最高的HMSPP3具有更优异的发泡性能。

**关键词:** 聚丙烯; 苯乙烯; 接枝; 熔体强度; 发泡质量

中图分类号: TQ325

文献标志码: A

文章编号: 1005-3360(2026)02-0009-07

DOI: 10.15925/j.cnki.issn1005-3360.2026.02.002

## Effect of Styrene Graft Modification on Foam Quality of Polypropylene

WEI Zipeng<sup>1,2</sup>, XING Jinfu<sup>1,2</sup>, ZHU Nenggui<sup>2</sup>, JIANG Tuanhui<sup>1,2</sup>, GONG Wei<sup>1\*</sup>

(1. School of Materials and Metallurgy, Guizhou University, Guiyang 550025, China; 2. National Engineering Research Center for Compounding and Modification of Polymer Materials, Guiyang 550022, China)

**Abstract:** The melt strength of polypropylene (PP) had a significant influence on foaming quality, and substantially improving its melt strength through simple methods was of great importance. In the study, styrene (St) was employed as the grafting monomer, and high melt strength polypropylene (HMSPP) was prepared via melt blending. The effects of St monomer on the melt flow rate, rheological properties, crystallization behavior, and foaming quality of PP were investigated. The results indicated that higher grafting degrees of St monomer led to lower melt flow rates of the products. The melt flow rate decreased from 103.6 g/10 min to 83.4 g/10 min upon the addition of St monomer, and the St monomer significantly enhanced the melt strength of PP. Furthermore, the products added St monomer exhibited higher complex viscosity and storage modulus, along with a smaller loss angle. Scanning electron microscopy results revealed that St monomer could markedly improve the foaming quality of PP. HMSPP3, which possessed the highest St monomer grafting degree, maintained excellent cell morphology with high uniformity and high density even at 200 °C. The cell density increased from  $8.14 \times 10^6$  cells/cm<sup>3</sup> to  $1.59 \times 10^7$  cells/cm<sup>3</sup>, while the average cell size decreased from 80 μm to 59 μm. Compared with PP, HMSPP3 with the highest grafting degree demonstrated superior foaming performance.

**Keywords:** PP; Styrene; Graft; Melt strength; Foam quality

聚丙烯(PP)是一种商用热塑性树脂<sup>[1-3]</sup>,具有使用温度高、拉伸模量高、耐化学性好、易加工成型等优点<sup>[4-8]</sup>,广泛应用于建筑、交通运输、航空航天等领域<sup>[9-13]</sup>。但PP熔体黏度和熔体强度对温度过于敏感<sup>[14-15]</sup>,一旦超出其适宜发

泡温度范围,熔体黏度和熔体强度会急剧下降,导致泡孔发生畸变甚至破裂,使发泡材料出现泡孔分布不均匀、发泡率低、开孔率大等问题,无法满足使用要求<sup>[16-17]</sup>。因此,提高熔体强度对获取发泡性能优异的产品极为重要。

收稿日期 Submitted date 2025-03-16; 修回日期 Revised date 2025-04-20; 录用日期 Accepted date 2025-05-27

基金项目: 国基后补助项目(黔师新苗[2021]27号); 中央引导地方资金项目([2024]036)

\*联系人, gw20030501@163.com

引用本文: 魏自鹏, 幸锦福, 朱能贵, 等. 苯乙烯接枝改性对聚丙烯发泡质量的影响[J]. 塑料科技, 2026, 54(2): 9-15.

Citation: WEI Z P, XING J F, ZHU N G, et al. Effect of styrene graft modification on foam quality of polypropylene[J]. Plastics Science and Technology, 2026, 54(2): 9-15.

目前,常用的提高PP熔体强度的方法主要有共混、交联和接枝<sup>[18-19]</sup>。其中,接枝是制备高熔体强度聚丙烯(HMSPP)最有效的方法之一<sup>[20]</sup>。接枝反应形成的长链支化结构具有明显的应变硬化特性、较高的熔体黏度和熔体强度<sup>[21-23]</sup>。研究人员基于此理论对PP进行了研究。WU等<sup>[24]</sup>采用熔融反应制备不同离子缔合量的锌接枝马来酸酐与聚丙烯共混物(PP-g-MAHZn)。结果表明:PP-g-MAHZn中成功形成了羧酸锌,随着羧酸锌含量增加,PP-g-MAHZn的结晶度下降,熔体黏度和熔体强度提高,这是由于聚合物链之间的离子相互作用和离子簇聚集限制了链段迁移率。MAROOFY等<sup>[25]</sup>采用马来酸酐对PP进行化学改性,与不同浓度的氧化锌进行熔体混合交联,接枝过程分别在150℃和180℃两个温度下进行。结果表明:较低的加工温度可显著提高接枝效率。LI等<sup>[26]</sup>利用聚醋酸乙烯酯(PVAc)改善苯乙烯接枝聚丙烯(HMSPP)的发泡性能。结果表明:PVAc对熔融接枝反应具有促进作用,加入PVAc不仅可提高HMSPP的熔体黏度和熔体强度,还能提高泡孔密度。王新如等<sup>[27]</sup>制备不同二氧化硅(SiO<sub>2</sub>)含量的聚对苯二甲酸乙二醇酯(PET)复合材料,研究SiO<sub>2</sub>对PET复合材料发泡温度窗口的影响。结果表明:随着SiO<sub>2</sub>添加量的增加,发泡温度窗口先变宽后变窄。

上述研究探讨了接枝单体或离子对PP熔体强度、结晶行为和流变行为的影响,但以苯乙烯(St)为接枝单体并采用简单接枝方法研究接枝产物对PP熔体强度和发泡性能影响的工作却鲜有报道。本研究以PP为基体、过氧化苯甲酰(BPO)为引发剂、St为接枝单体,采用熔融共混制得高熔体强度的HMSPP,通过流变分析、熔体流动速率和差示扫描量热分析等,观察St对PP熔体强度、熔体黏度以及结晶行为的影响。本研究在不同温度下发泡,通过分析泡孔形态、泡孔密度以及泡孔尺寸,探讨St对PP发泡质量的影响,为提高PP熔体强度以及在不同发泡温度范围的应用提供实验基础。

## 1 实验部分

### 1.1 主要原料

PP, BX3920, 熔体流动速率 100 g/10 min (ASTM D—1238), 中国石油化工股份有限公司; 低密度聚乙烯(LDPE), 2426H, 熔体流动速率 1.6 g/10 min, 中国石油化工股份有限公司; 偶氮二甲酰胺(AC), 发气量 215~230 mL/g, 武汉汉洪化工厂; St, 分析纯, 上海麦克林化学试剂有限公司; BPO, 质量分数 99.0%, 上海麦克林化学试剂有限公司。

### 1.2 仪器与设备

注塑成型机, EM120-V, 具有二次开模程序, 震德塑料机械有限公司; 化学微发泡专用标准样条模具, GCFP-16, 型芯厚度可调, 贵州省材料产业技术研究院; 双螺杆挤出机, CTE-35, 科倍隆科亚(南京)机械有限公司; 电热恒温鼓风干燥箱, DHG-9146A, 福州精科仪器仪表有限公司; 立式

塑料搅拌机, HBQB-50 kg, 佛山市红宝机械科技有限公司; 熔体流动速率仪(MFR), CEAST7026, 意大利 Ceast 公司; 旋转流变仪, MARS60, 美国赛默飞世尔科技公司; 扫描电子显微镜(SEM), KYKY-2800B, 北京中科科仪股份有限公司; 差示扫描量热仪(DSC), Diamond DSC, 美国 PE 公司。

### 1.3 样品制备

#### 1.3.1 HSMPP的制备

表1为HMSPP的配方。将BPO、St按表1配比加入PP中,在搅拌机中搅拌20 min,然后送入双螺杆挤出机。挤出加工温度分别为165、165、170、175、180、185、185、190℃;螺杆转速为200 r/min,进料速度为20 r/min,切粒机的转速为15 r/min,最终获得HMSPP颗粒。

表1 HMSPP的配方

Tab.1 Formula of HMSPP

单位:g

样品名称	$m_{PP}$	$m_{BPO}$	$m_{St}$
PP	100	0.0	0.0
HMSPP0	100	0.5	0.0
HMSPP1	100	0.5	2.5
HSMPP2	100	1.5	5.0
HMSPP3	100	2.5	10.0
HMSPP4	100	3.5	15.0

#### 1.3.2 发泡剂母粒的制备

把LDPE颗粒和AC粉末先放入干燥机中干燥4 h,温度设为60℃。随后以9:1的质量比混匀,挤出机挤出造粒,从而得到发泡剂母粒。挤出机各段温度分别设置为105、110、115、120、120、115、110、110℃;挤出机螺杆的转速为280 r/min,进料螺杆的速度为23 r/min。切粒机的转速为17 r/min。需要注意的是,本研究中所有实验均使用自制的AC发泡剂母粒。

#### 1.3.3 发泡样条的制备

先将制备好的HMSPP于80℃干燥箱中干燥4 h,然后将HMSPP与发泡剂母粒按质量份数为100:5的比例通过搅拌机搅拌,混合均匀后利用化学微发泡二次开模方法制备标准测试发泡样条,为满足标准测试要求,样条成型厚度为4 mm,微发泡后的质量减轻幅度为20%。发泡温度分别为180、190、200℃,注射压力为50 MPa,注射速度为90%,注射时间为0.6 s,冷却时间为20 s。

### 1.4 性能测试与表征

测定接枝率以及接枝效率:取2~4 g St接枝产物放入索氏提取器,用乙酸乙酯抽提24 h,除去未反应的单体及其均聚物,随后烘干称重。接枝率及接枝效率的计算公式分别为(测定样品为未发泡的材料):

$$\text{接枝率} = \frac{w_1 - w_0}{w_1} \times 100\% \quad (1)$$

$$\text{接枝效率} = \frac{w_1 - w_0}{w_2} \times 100\% \quad (2)$$

式(1)~式(2)中: $w_0$ 为纯PP的质量,g; $w_1$ 为HMSPP抽提后的质量,g; $w_2$ 为加入的St的质量,g。

MFR测试:按GB/T 3682.1—2018进行测试,温度为230 °C,负荷为2.16 kg。

流变学行为测试:在旋转流变仪上进行动态流变学测量,平行板直径为25 mm,间隙高度为1 mm的,频率为0.1~400.0 rad/s,线性黏弹性范围应变为1%。流变温度扫描测试范围为200~130 °C,冷却速率为10 °C/min,频率扫描为5 Hz,应变为0.5%。所有的测量均在氮气气氛下进行,以防止聚合物降解和吸湿。

SEM表征:将发泡样品在液氮中冷冻断裂,然后喷射镀金,再进行表征。通过Image Pro-plus软件计算细胞大小。共测量3幅图像和至少50个泡孔,以获得每个发泡样品的平均泡孔直径。泡孔密度( $N_0$ )是指每立方厘米固体聚合物中的泡孔数,计算公式为:

$$N_0 = \left( \frac{nM^2}{A} \right)^{3/2} R_v \quad (3)$$

式(3)中: $n$ 为扫描电子显微图中的泡孔数; $M$ 为放大倍数; $A$ 为显微图面积,cm<sup>2</sup>; $R_v$ 为发泡的体积膨胀比。

DSC分析:在氮气气氛下,先升温至200 °C,保持3 min以消除热历史,然后降温至30 °C,再升温至200 °C,升降温速率均为10 °C/min,根据第二次升温曲线结果得到试样的熔融特性数据。

## 2 结果与讨论

### 2.1 St加入量与接枝效果的关系

在常用的表征手段中,MFR通常可以反映聚合物熔体强度。表2为HSMPP的接枝率、接枝效率和MFR。从表2可以看出,PP经过挤出工艺后,其MFR相较于标准值有所增大,这是由螺杆的剪切造成的。加入St单体进行接枝后,尽管单体的量始终在增加,但接枝率及接枝效率均随单体加入量先增大后减小的,成功接枝St单体含量最大的为HSMPP3。出现这种情况可能是由于St单体接枝大部分发生在PP的无定形区,因此可以被用来接枝的位点有限,其接枝效率不会随着St单体的含量的增加而增大。而在加入大量St单体后,其本身的自聚反应也会增强,接枝率降低。此外,St接枝率与MFR成反比,当St单体质量分数为10%(HMSPP3)时,MFR最低。这是因为随着成功接枝的St单体含量增加,HMSPP链支化的数量及其链长度都有所增加,加重了分子链的长链分支反应,降低了HMSPP的流动速率,这也反映出St单体的接枝增强了PP的熔体强度。HMSPP0中加入了引发剂但未加入St单体,没有产生接枝反应,与PP试样的MFR几乎相同。这说明仅加入引发剂不能提高PP的熔体强度,而加入St单体可以提高PP的熔体强度。利用St接枝成功得到了HMSPP,且单体添加质量分数为10%的HMSPP3的MFR

最低,熔体强度最高。

表2 HSMPP的接枝率、接枝效率和MFR

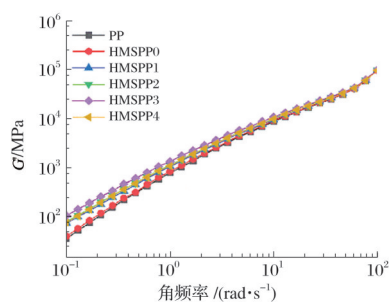
Tab.2 Grafting rate, grafting efficiency and MFR of HSMPP

样品名称	$w_{st}/\%$	MFR/[g·(10 min) <sup>-1</sup> ]	接枝率/%	接枝效率/%
PP	0.0	103.6	—	—
HMSPP0	0.0	105.3	—	—
HMSPP1	2.5	96.2	1.2	47.2
HSMPP2	5.0	90.8	2.6	52.7
HMSPP3	10.0	83.4	3.5	36.3
HMSPP4	15.0	91.3	2.8	19.8

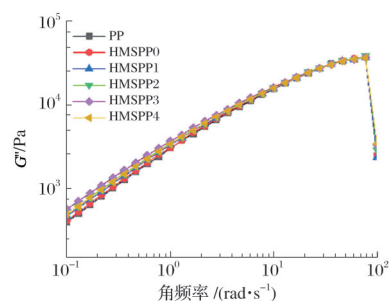
注:“—”表示无相关数据。

### 2.2 HMSPP体系的流变学分析

对共混接枝得到的HMSPP进行流变测试,图1为HMSPP流变测试结果。从图1可以看出,在加入单体后St,HMSPP体系的复数黏度( $\eta^*$ )、储能模量( $G'$ )和损耗模量( $G''$ )与PP相比均有明显提高,St添加量越大, $\eta^*$ 、 $G'$ 和 $G''$ 提高得越多,HMSPP3的 $G'$ 和 $\eta^*$ 最大,此时继续增大St单体含量、 $\eta^*$ 和 $G'$ 反而开始降低。这表明St与PP接枝后,增强分子链之间的物理缠结,提升产物的流变性能;但加入过多St单体后,大量St单体发生自聚反应生成第二产物聚苯乙烯(PS),在降低接枝效率的同时也降低了接枝率,减少长支链结构的生成,从而造成流变性能有所下降。未加入St单体的HMSPP0的各项流变性能与PP几乎相同,说明仅加入引发剂对材料的性能几乎没有影响。损耗角正切( $\tan \delta$ )定义为 $G'$ 和 $G''$ 的比值,可以从侧面反映HMSPP的长支链化现象。对于接枝改性后的HMSPP,低频段 $\tan \delta$ 显著降低,这表明St接枝让HMSPP分子链产生长支链结构。流变测试结果与MFR测试值的规律一致。



(a)  $G'$



(b)  $G''$

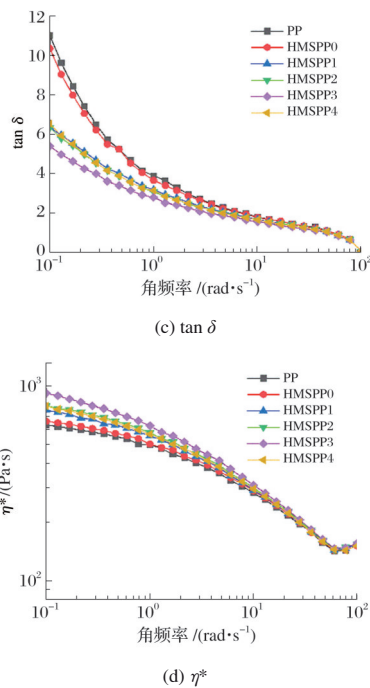


图1 HMSPP流变测试结果

Fig.1 Rheological test results of HMSPP

MFR和剪切流变结果证实,St单体的添加质量分数为10%时,HMSPP3发生了长链支化反应,产生长支链结构。以上研究说明一种可能的接枝机理。图2为St单体的接枝机理<sup>[26]</sup>。从图2可以看出,长支链结构主要由St和PP分子链的微交联形成。在接枝反应中,大部分St分子像桥梁一样连接两条或多条PP分子链(结构A),剩下的St分子则连接到PP骨架上(结构B)。

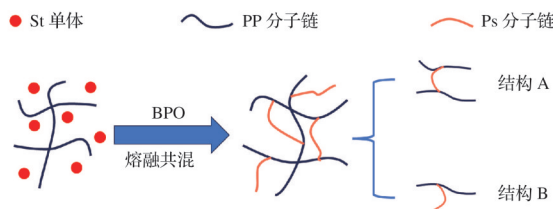


图2 St单体的接枝机理

Fig.2 Grafting mechanism of St monomer

### 2.3 HMSPP体系的DSC分析

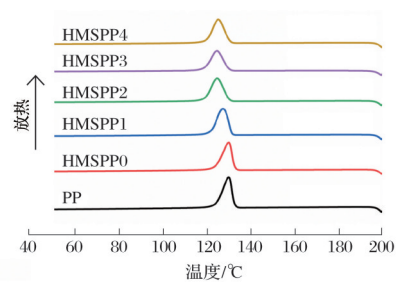
对HMSPP的结晶行为和热性能进行测试,图3为HMSPP的DSC曲线。表3为HMSPP的DSC表征参数,包括HMSPP体系的结晶温度( $t_c$ )、结晶焓( $\Delta H_c$ )、熔融焓( $\Delta H_m$ )和结晶度( $X_c$ )。其中, $X_c$ 的计算公式为:

$$X_c = \Delta H_m / \Delta H_m^0 \times 100\% \quad (4)$$

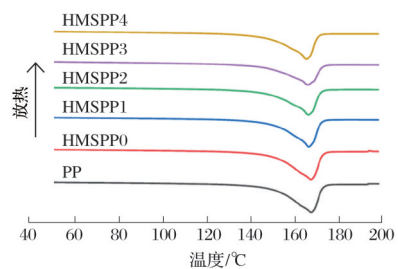
式(4)中: $\Delta H_m^0$ 为100%结晶PP的熔化焓,为207.1 J/g。

从图3和表3可以看出,HMSPP0的 $t_c$ 与PP相比相差不大,但 $X_c$ 却相差6.5%。这说明引发剂BPO的存在会限制PP分子链的迁移,阻碍结晶。但加入St发生接枝反应后,由于非均相成核效应,HMSPP的 $X_c$ 得到提高。随着St单体含量的增加, $X_c$ 先增大后降低。从图3a

可以看出,HMSPP3的 $t_c$ 与PP相比降低4.57 °C,结晶峰更低、更小, $X_c$ 更低。这是由于St单体以两种形式存在,一种是自聚形成的PS,另一种是接枝在PP上形成长支链结构。这就导致PS的存在增加了非晶部分的比例。同样,接枝率的增加导致长链支化结构增多,增加了分子间的缠结,从而抑制了HMSPP分子链段在结晶过程中的迁移和排列,进而抑制HMSPP的结晶。HMSPP2的 $X_c$ 略高于HMSPP3,这也说明HMSPP3所含有的长支链结构最多,在WU等<sup>[24]</sup>的研究中同样出现此现象。除了HMSPP4的 $X_c$ 进一步降低之外,HMSPP在吸热熔融的过程中出现了双熔融峰(图3b)。出现肩峰的原因可能是接枝中产生的长支链结构导致分子链缠结严重,使其熔融过程更困难。



(a) 结晶曲线



(b) 熔融曲线

图3 HMSPP的DSC曲线

Fig.3 DSC curves of HMSPP

表3 HMSPP的DSC表征参数

Tab.3 DSC characterization parameters of HMSPP

样品名称	$t_c/^\circ\text{C}$	$\Delta H_c/(\text{J}\cdot\text{g}^{-1})$	$\Delta H_m/(\text{J}\cdot\text{g}^{-1})$	$X_c/\%$
PP	129.84	109.10	90.71	43.80
HMSPP0	130.03	101.03	77.32	37.33
HMSPP1	127.69	98.75	78.51	37.91
HMSPP2	125.40	92.54	82.74	39.95
HMSPP3	125.27	84.44	79.11	38.20
HMSPP4	125.68	92.87	76.94	37.15

上述研究表明,加入St单体接枝的HMSPP中含有长支链结构,这赋予了HMSPP更高的熔体黏度和熔体强度,有利于生产高密度、高均匀性和形态良好的泡孔。针对此结论,进一步研究PP和HMSPP分别在180、190、200 °C温

度下的发泡性能。低温脆断后,利用扫描电子显微镜观察发泡样品断面的泡孔形态和泡孔大小分布。图4为180 °C发泡HMSPP的SEM照片。从图4可以看出,在180 °C下,PP的发泡质量远低于加入单体接枝的HSMPP,随着St含量的增多,HMSPP的发泡质量得到改善,泡孔的密度有所增大。

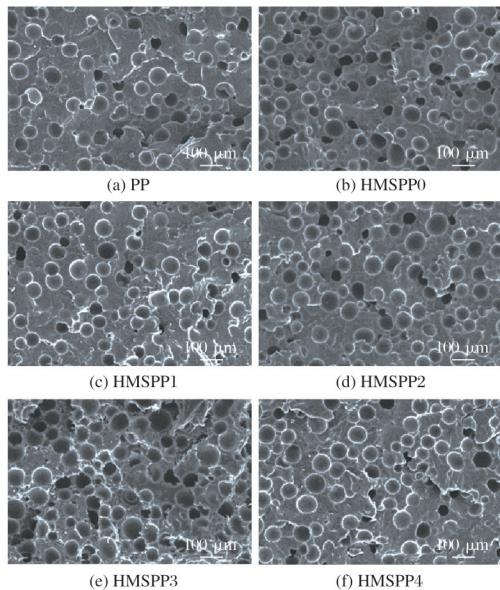


图4 180 °C发泡HMSPP的SEM照片(100×)

Fig.4 SEM images of of HMSPP foamed at 180 °C (100×)

图5为190 °C发泡HMSPP的SEM照片。从图5可以看出,发泡温度升高至190 °C时,发泡PP的泡孔尺寸变大。这是由于高温增强了熔体的流动性,降低了熔体强度。但加入St单体接枝的HMSPP发泡质量并没有因为温度的升高出现明显的下降,仍具有较高密度和较小尺寸的泡孔。这是由于接枝产生的长支链结构增强了熔体强度,使其对泡孔的约束更强。

图6为200 °C发泡HMSPP的SEM照片。从图6可以看出,当发泡温度升高至200 °C,PP显示出规则的泡孔结构,泡孔尺寸差异巨大,泡孔出现畸变和并泡的现象。这是因为高温下PP的熔体强度降低,低熔体强度使PP泡孔发生畸变甚至破裂,从而发泡PP的开孔含量高,泡孔的均匀性差。此外,HMSPP0的发泡质量与PP几乎相同,说明引发剂BPO的加入不能提高熔体强度。加入单体后,泡孔质量得到显著改善,并泡现象被明显抑制,随着St含量的增加,发泡性能逐渐提升。加入10% St单体的HMSPP3在200 °C下的发泡质量最佳,泡孔尺寸的均匀性得到改善,闭孔含量也较高。这些结果是由HMSPP3的高熔体强度决定的,其抑制细胞的聚结和破裂。HMSPP中的长链支化结构增加了HMSPP的黏度和存储模量,从而使HMSPP3的熔体强度和发泡性能优于PP,这与流变学分析结果相同。St单体的接枝使PP获得大量的长支链结构,长链支化加重了HMSPP分子链的缠结,因此提高熔

体强度。上述结果表明,HMSPP3在高温下的熔体强度更高,进而固泡率更高,可以在高温下获得优异的发泡性能。

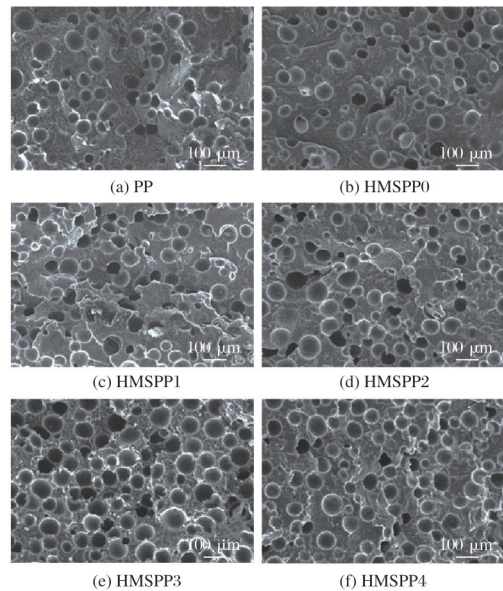


图5 190 °C发泡HMSPP的SEM照片(100×)

Fig.5 SEM images of of HMSPP foamed at 190 °C (100×)

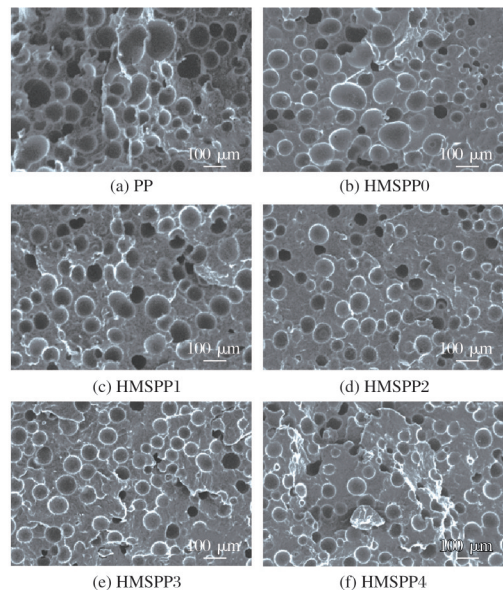


图6 200 °C发泡HMSPP的SEM照片(100×)

Fig.6 SEM images of of HMSPP foamed at 200 °C (100×)

针对200 °C下不同St含量的HMSPP发泡质量的巨大差异,测量了200 °C下所有发泡样品的泡孔尺寸分布、泡孔密度和平均泡孔尺寸。图7为200 °C下发泡HMSPP泡孔尺寸分布。图8为200 °C发泡HMSPP的泡孔密度和平均泡孔尺寸。从图7和图8可以看出,HMSPP0的泡孔尺寸分布与PP相似,但平均泡孔尺寸比PP的要大,这说明引发剂BPO的加入没有明显提升发泡性能。上述DSC与剪切流变的分析也表明,HMSPP0 X<sub>c</sub>降低的同时,没有提升熔体的 $\eta^*$ 和G'。随着St含

量的增加,泡孔尺寸分布逐渐变窄,并且向小尺寸方向发展,平均泡孔尺寸从80  $\mu\text{m}$ 下降至59  $\mu\text{m}$ ,泡孔密度从 $8.14 \times 10^6$ 个/ $\text{cm}^3$ 增大至 $1.59 \times 10^7$ 个/ $\text{cm}^3$ 。这说明接枝后产生的长链支化结构可以抑制泡孔长大,St的加入不仅提高熔体强度,而且还在发泡过程中促进泡孔成核。其中,泡孔密度最大的是HMSPP3,达到 $1.59 \times 10^7$ 个/ $\text{cm}^3$ ,同时泡孔尺寸也集中在59  $\mu\text{m}$ 左右。这是因为HMSPP3含

有的长支链结构最多,熔体强度最高,泡孔在生长过程中受到抑制,泡孔尺寸较小;又由于成功接枝的St单体含量的增大,为泡孔提供更多的成核位点。因此,HMSPP3具有最好的发泡性能,这与上述的DSC与剪切流变分析结果吻合。结果表明:St单体的加入可以提高PP的熔体强度,从而降低其对温度的敏感性,在高温下发泡PP也具有优异的发泡质量。

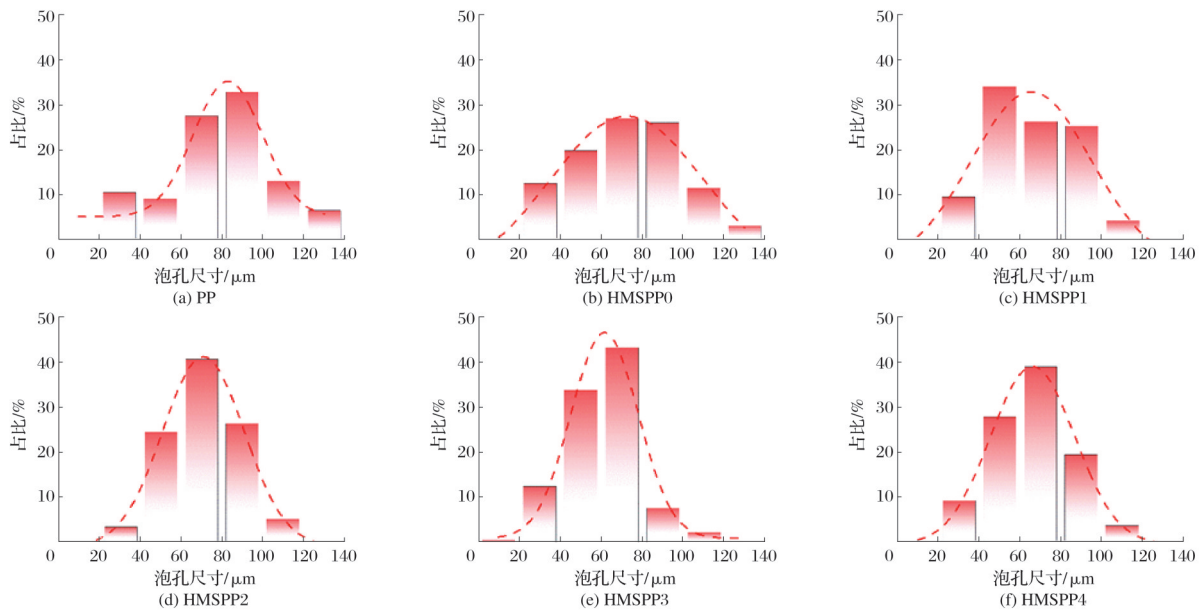


图7 200 °C下发泡HMSPP泡孔尺寸分布

Fig.7 Cell size distribution of of HMSPP foamed at 200 °C

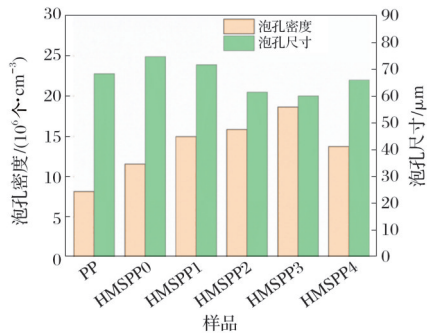


图8 200 °C发泡HMSPP的泡孔密度和平均泡孔尺寸

Fig.8 Cell density and average cell size of HMSPP foamed at 200 °C

### 3 结论

采用熔融共混法制备了不同St单体含量的HMSPP。St接枝后显著提高了PP的熔体强度。但持续增加St单体的含量,接枝率和接枝效率不能无限提高。其中,接枝率最高的为HMSPP3,此时St的添加质量分数为10%。DSC测试、MFR测试以及流变学表征结果说明HMSPP3的MFR最低、 $\eta^*$ 和 $G'$ 最高,具有最高的熔体强度。在改善发泡质量方面,St单体接枝后获得的HMSPP的发泡质量普遍优于PP。此外,当发泡温度为200 °C时,相较于PP,HMSPP3的泡孔密度从 $8.14 \times 10^6$ 个/ $\text{cm}^3$ 增大至

$1.59 \times 10^7$ 个/ $\text{cm}^3$ ,平均泡孔尺寸从80  $\mu\text{m}$ 下降至59  $\mu\text{m}$ ,泡孔没有发生并泡和畸变,即使较高的加工温度下也展现出优异的发泡性能。

### 参考文献

- [1] HOSSAIN M T, SHAHID M A, MAHMUD N, et al. Research and application of polypropylene: A review[J]. Discover Nano, 2024, 19 (1): 2.
- [2] EMBABI M, KWEON M S, WANG Y X, et al. Foaming performance of linear polypropylene ionomers[J]. Macromolecules, 2022, 55(13): 5645-5655.
- [3] ZHU N G, SHEN C, ZENG X B, et al. Enhancing the foaming properties of polypropylene/basalt fiber composites by altering their rheological and crystallization behavior via polyethylene-octene blending modification[J]. Polymer Composites, 2023, 44(11): 7631-7642.
- [4] WANG G, DONG M Y, DENG H H, et al. Polypropylene foaming using supercritical carbon dioxide: A review on fundamentals, technology, and applications[J]. Advanced Composites and Hybrid Materials, 2024, 8(1): 84.
- [5] MAQSOOD Z, KOSEKI J, KYOKAWA H. Mechanical behaviour and stress-strain recovery characteristics of expanded polypropylene[J]. Geosynthetics International, 2024, 31(1): 18-30.
- [6] DENG R, JIANG T H, LIU B J, et al. Visual observation and numerical

- studies of bubble formation of polypropylene chemical foaming system in the different injection foaming environment[J]. *Journal of Polymer Research*, 2022, 29(9): 363.
- [7] LI M C, HUANG T K, QIN Y L, et al. Preparation process orthogonal optimization and mechanical properties of microcellular foam polypropylene[J]. *Macromolecular Materials and Engineering*, 2021, 306(10): 2100350.
- [8] 董亚鹏. 有机羧酸盐聚丙烯成核剂复配体系的构建及作用机理研究[D]. 太原: 太原科技大学, 2025.
- [9] XING J F, GU J, LIU B J, et al. Fabrication of lightweight, tough polypropylene composite foams: Effects of nucleating agent structure on the foaming behavior and tensile property of polypropylene foams[J]. *Journal of Polymer Research*, 2024, 31(5): 142.
- [10] GONG W, ZHANG D, ZHANG C, et al. Deformation and simulation of the cellular structure of foamed polypropylene composites[J]. *Polymers*, 2022, 14(23): 5103.
- [11] YU S R, SONG S Z, GAO H, et al. Crystallinity and mechanical properties of polypropylene products foamed by microcellular injection molding process[J]. *Journal of Applied Polymer Science*, 2024, 141(21): e55418.
- [12] ZHAO J L, GUO W, ZHAO F, et al. Effect of inorganic nanoparticles on polypropylene in-mold decoration and microcellular foaming injection molding composites[J]. *Polymer Engineering & Science*, 2024, 64(10): 5061-5072.
- [13] LI X J, ZUO Z M, MI H Y, et al. High-strength, impact-resistant PP/PTFE composite foam with enhanced surface appearance achieved through mold-opening microcellular injection molding[J]. *Polymer*, 2024, 311: 127527.
- [14] YANG X, PEI X L, XU J J, et al. Influence of temperature distribution on the foaming quality of foamed polypropylene composites[J]. *e-Polymers*, 2023, 23: 20228093.
- [15] KRÄMER J, GUEDES DE LA CRUZ G C, KERN W, et al. Increasing the melt viscosity of post-consumer recycled polypropylene via e-beam techniques[J]. *Radiation Physics and Chemistry*, 2024, 222: 111846.
- [16] YANG D S, YANG X, CHEN Q, et al. Study on microcosmic properties and temperature simulation of foamed polypropylene composites[J]. *Scientific Reports*, 2024, 14: 27626.
- [17] MUÑOZ-PASCUAL S, LOPEZ-GONZALEZ E, SAIZ-ARROYO C, et al. Effect of mold temperature on the impact behavior and morphology of injection molded foams based on polypropylene polyethylene-octene copolymer blends[J]. *Polymers*, 2019, 11(5): 894.
- [18] LÓPEZ-BARRÓN C R, LAMBIC N S, THROCKMORTON J A, et al. One-pot synthesis of high-melt-strength isotactic polypropylene ionomers[J]. *Macromolecules*, 2022, 55(1): 284-296.
- [19] DE SARKAR M, CHANDEL N, BANERJEE S S, et al. Development of high melt strength polypropylene and its application in thermoplastic elastomeric composition[J]. *Journal of Elastomers & Plastics*, 2022, 54(3): 429-456.
- [20] QIU Z B, LI X R, WU H, et al. A new method for preparing anhydride grafted polypropylene with high grafting ratio by combining microwave reaction and reactive extrusion[J]. *Journal of Polymer Research*, 2023, 30(8): 319.
- [21] HUANG Y G, HONG H Q, ZHANG H Y. Interface structure and properties of polypropylene/wood flour composites reinforced with grafted polypropylene compatibilizer[J]. *ChemistrySelect*, 2024, 9(40): e202401403.
- [22] KUČERA F, PETRUŠ J, BÁLKOVÁ R, et al. Solid-state grafting of maleic anhydride onto polypropylene: The influence of morphology of polypropylene on heterogeneous reaction[J]. *Polymer Engineering & Science*, 2020, 60(5): 1076-1082.
- [23] FENG A X, LIN Y K, SUN D Y, et al. Mesoporous silica nanoparticle grafted polypropylene membrane toward long-term efficient oxygenation[J]. *Small Structures*, 2025, 6: 2400324.
- [24] WU M H, WANG C C, CHEN C Y. Preparation of high melt strength polypropylene by addition of an ionically modified polypropylene[J]. *Polymer*, 2020, 202: 122743.
- [25] MAROOFY H N, HAFEZI M J. Ionic cross-linking of polypropylene: Effect of maleic anhydride grafting temperature and ionic plasticizer[J]. *Journal of Polymer Research*, 2024, 31(8): 243.
- [26] LI Y, PAN C M, XIN Z, et al. Rheological, crystallization and foaming behaviors of high melt strength polypropylene in the presence of polyvinyl acetate[J]. *Journal of Polymer Research*, 2018, 25(2): 46.
- [27] 王新如, 庞永艳, 邵玮玮, 等. PET/SiO<sub>2</sub>复合材料的发泡温度窗口研究[J]. *工程塑料应用*, 2023, 51(4): 57-62.