

doi:10.3969/j.issn.1001-3539.2019.01.006

木粉 / POE 协同改性 PP 的超临界 CO₂ 发泡性能

刘伟,王臣,杨明警,严正

(四川大学高分子科学与工程学院,成都 610065)

摘要:采用超临界二氧化碳作为发泡剂,用自制的高压反应釜,在一定温度、压力和保压时间等工艺条件下,探讨经预处理的木粉对高熔体强度聚丙烯 (PP) / 木粉发泡材料发泡性能的影响。当木粉用量为 4 份时,PP / 木粉发泡材料发泡性能最佳,其发泡倍率最大,为 12.6 倍,表观密度最小,为 0.069 g/cm³,泡孔平均直径为 79 μm。在木粉用量为 4 份基础上,研究乙烯-辛烯共聚物 (POE) 用量对 PP / 木粉 / POE 发泡材料发泡性能的影响。结果表明,当 POE 用量为 15 份时,得到最佳发泡性能的 PP / 木粉 / POE 发泡材料,其发泡倍率最大,为 14.8 倍,表观密度最小,为 0.06 g/cm³,泡孔平均直径为 174 μm,泡孔分布最均匀。

关键词:聚丙烯;木粉;乙烯-辛烯共聚物;超临界 CO₂;发泡性能

中图分类号: TQ325.1 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3539(2019)01-0031-07

Supercritical CO₂ Foaming Performance of Wood Flour / POE Co-modified PP

Liu Wei, Wang Chen, Yang Mingjing, Yan Zheng

(College of Polymer Science and Engineering, Sichuan University Chengdu 610065, China)

Abstract : Supercritical carbon dioxide was used as a blowing agent, and a self-made high pressure reactor was used, under the conditions of certain temperature, pressure and pressure holding time, the effects of pretreated wood flour on foaming properties of high melt strength polypropylene (PP) / wood flour foaming materials. The best foaming performance is obtained when the wood powder content is 4 phr, the expansion ratio is the maximum, which is 12.6 times, the apparent density is minimum, which is 0.069 g/cm³, and the cell diameter is 79 μm. On the basis of 4 phr of wood flour, the effects of the amount of ethylene-octene copolymer (POE) on the foaming properties of PP / wood flour / POE foaming materials was studied. The results show that the PP / wood flour / POE foaming material with optimum foaming properties is obtained when the POE content is 15 phr, the expansion ratio is the maximum, which is 14.8 times, the apparent density is minimum, which is a 0.06 g/cm³, the cell diameter is 174 μm, and the microscopic cell distribution is the most uniform.

Keywords : polypropylene ; wood flour ; ethylene-octene copolymer ; supercritical CO₂ ; foaming performance

聚丙烯 (PP) 是五大通用塑料之一,具有非常良好的耐热性能及力学性能。经熔融发泡制备的 PP 发泡材料因具有可降解性,被称为绿色泡沫塑料^[1],其耐热温度高达 130℃,并且耐冲击性能也得到很大提高,相比聚苯乙烯 (PS) 和聚乙烯 (PE) 等其它发泡材料,其性能更加优异^[2-4],此外,PP 发泡材料无毒无臭,清洁环保,所以,其具有代替现有传统发泡材料的可能性^[5]。虽然 PP 发泡材料具有许多优点,但是却很难采用传统的发泡法对其进行发泡,这主要是因为 PP 属于半结晶性聚合物,可发泡温度

区间相对比较狭窄 (只有 4℃左右)^[6]。因此,想要得到泡孔结构良好、发泡质量高的 PP 发泡材料,就必须改进传统发泡法,扩大发泡温度区间,提高其熔体强度,并改善 PP 基体的黏弹性^[7]。周吓星等^[8]以乙烯-辛烯共聚物 (POE) 填料增韧 PP / 竹粉发泡复合材料,虽然加入 POE 能够提高复合材料的结晶温度和聚合物基体的熔体黏度,减小泡孔尺寸,增加泡孔密度,促使泡孔尺寸分布更均匀,但同时存在操作困难,未经改性的竹粉的加入不利于均匀泡孔的形成等问题,导致发泡效果不理想。王朝等^[9]采

通讯作者: 严正,教授,博士,主要从事高分子材料加工装备及模具 (CAD / CAE) 优化设计 E-mail : yanzheng@scu.edu.cn

收稿日期: 2018-10-24

引用格式: 刘伟,王臣,杨明警,等. 木粉 / POE 协同改性 PP 的超临界 CO₂ 发泡性能 [J]. 工程塑料应用,2019,47(1) : 31-37.

Liu Wei, Wang Chen, Yang Mingjing, et al. Supercritical CO₂ foaming performance of wood flour / POE co-modified PP[J]. Engineering Plastics Application, 2019, 47(1) : 31-37.

用超临界 CO_2 间歇发泡的方法研究了 POE 用量对 PP 微孔发泡材料泡孔的影响,结果表明,随着 POE 用量的增加,泡孔平均直径增大,泡孔密度降低。笔者采用硅烷偶联剂改性木粉和 POE 协同增韧高熔体强度 PP 发泡材料,用易操作控制的间歇式釜压发泡装置,利用釜压发泡一步法^[10]制备微孔发泡木塑复合材料,研究改性木粉/POE 以及添加量对 PP 发泡性能的影响,为实现工业化生产提供参考。

1 实验部分

1.1 主要原料

PP: Daploy WB130HMS, 北欧化工有限公司;
液体石蜡: 分析纯, 成都市科龙化工试剂厂;
硅烷偶联剂: KH560, 南京奥诚化工有限公司;
马来酸酐接枝 PP (PP-g-MAH): FT900P, 南京

飞腾化工有限公司;

硬脂酸: 分析纯, SA-1841, 苏州市华鲈化工科技有限公司;

乙醇: 分析纯, 成都长联化工试剂有限公司;
POE: 8003, 美国陶氏有限公司;
木粉、 CO_2 气体: 市售。

1.2 主要仪器及设备

超临界流体反应釜: 自制;

电热恒温干燥箱: ZT-82B 型, 上海市实验仪器总厂;

数字电子秤: I2000 型, 东莞市南城长协电子制品厂;

转矩流变仪: XSS-300 型, 上海科创橡塑设备有限公司;

平板硫化机: 50T 型, 成都力士液压制造有限公司;

精密电子搅拌器: QW-400 型, 杭州齐威仪器有限公司;

扫描电子显微镜 (SEM): Quanta 250 型, 美国 FEI 公司。

1.3 试样制备

用硅烷偶联剂对木粉进行表面改性处理^[11], 然后将表面处理过的木粉和 PP, POE 以及各种助剂按照表 1 配方在转矩流变仪中进行充分密炼, 设置密炼三区温度为 190°C , 转速为 40 r/min , 密炼 8 min 之后出料, 冷却。用平板硫化机将已经密炼好的物料压制成为标准样条, 压制参数设置为 180°C 和 15 MPa 。再用裁刀将其裁剪成尺寸为 $1.5\text{ mm} \times 40\text{ mm} \times 10\text{ mm}$ 的矩形样条。然后将样条放入反应釜之中进行发泡, 反应釜压力 10 MPa ,

温度 $(136 \pm 2)^\circ\text{C}$ (根据不同配方适度调整发泡温度, 使制品达到更好发泡状态), 在此状态下保持 20 min , 然后关闭加热装置, 打开泄压阀门快速泄压, 泄压完成之后将装置快速冷却, 使得气泡固化成型, 最后得到发泡制品, 进行各种发泡性能测试。

表 1 PP/木粉/POE 复合发泡材料配方 份

试样编号	PP	木粉	KH560	POE
WPC100	100			
WPC98	98	2	0.12	
WPC96	96	4	0.24	
WPC94	94	6	0.36	
WPC90	90	10	0.6	
WPCP95	96	4	0.24	5
WPCP90	96	4	0.24	10
WPCP85	96	4	0.24	15
WPCP80	96	4	0.24	20
WPCP75	96	4	0.24	25

注: 除试样 WPC100 外, 其它试样中还包含 PP-g-MAH, 硬脂酸和石蜡, 其用量分别为 6, 0.25, 1 份。

1.4 性能测试

表观密度按照 GB/T 6343-2009 测试。

发泡倍率 ϕ 是未发泡之前材料的密度 ρ_p 与发泡之后材料的密度 ρ_f 的比值^[12], 即:

$$\phi = \rho_p / \rho_f \quad (1)$$

SEM 分析: 将发泡试样在液氮之中浸泡 40 min 以上, 脆断, 在真空环境中对断面进行喷金处理, 用 SEM 观察断面微观形貌。

泡孔平均直径: 以 SEM 照片中缺陷较少的泡孔为样品, 利用 Image-pro-plus 软件进行分析处理, 从而得到泡孔平均直径^[13]。

泡孔密度: 由 Kumar 公式计算^[10]。

材料结晶性能测试: 取样品 $5 \sim 10\text{ mg}$, 放置密封铝盘中, 氮气保护。先将样品以 10°C/min 的升温速率由 20°C 升温至 220°C , 并记录数据, 再以 20°C/min 降温速率冷却至 20°C , 然后以 10°C/min 升温速率升温至 220°C , 记录下第二次升温过程中的数据。结晶度按式 (2) 计算:

$$X_c = \frac{\Delta H}{\Delta H_0} \times 100\% \quad (2)$$

式中: X_c ——样品的结晶度;

ΔH ——样品的熔融焓, J/g ;

ΔH_0 ——PP 结晶 100% 时的熔融焓, 为 209 J/g 。

2 结果与讨论

2.1 木粉用量对 PP/木粉发泡材料发泡性能的影响

图 1 是不同木粉用量下 PP/木粉发泡材料的发泡倍率和表观密度。

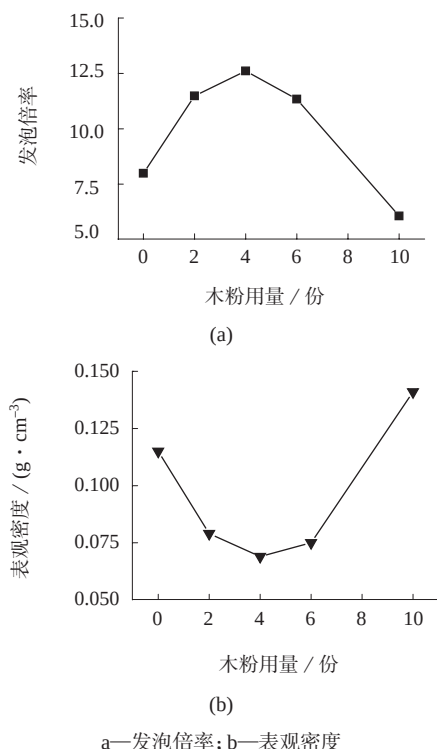


图1 不同木粉用量下 PP / 木粉发泡材料的发泡倍率和表观密度

由图1可以看出,在不添加改性木粉的条件
下,纯 PP 的发泡倍率为 8 倍,相应的表观密度为
0.115 g/cm³;随着木粉用量的增加,PP / 木粉的发
泡倍率表现出先增大后减小的趋势,当木粉用量为
4 份时,PP / 木粉的发泡倍率最高,达 12.6 倍,此时
的表观密度最低,为 0.069 g/cm³;继续增加改性
木粉的用量,体系的发泡倍率急剧下降,当木粉用
量为 10 份时,发泡倍率降为 5.8 倍,低于纯 PP 的
发泡倍率,而表观密度暴增到 0.138 g/cm³。这是
因为经过改性的木粉表面形成大量的疏水性有机
基团,从而降低木纤维表面的亲水性,提高其与
PP 基体的相容性,使木粉充分地分散于 PP 中,
表面粗糙的木粉与基体形成的液 - 固界面成为
低能点,可以吸附更多的 CO₂ 气体,形成大量的
不稳定成核点^[14],具有成核作用,提高发泡材
料的发泡效果,且成核点随着木粉用量的增加逐
渐增多,利于泡核形成和增长,因此表观密度变
化呈递减趋势;虽然改性木粉具有很好的成核作
用,但也不是越多越好,当木粉用量超过 4 份时,
其在基体中的分散性能变差,出现部分木粉团聚
现象,提高了材料的熔体黏度,减少了成核点,即
使出现了部分泡核,但是因为 CO₂ 气体不易在高
黏度熔体中扩散,反而降低了材料的发泡性能,
出现发泡倍率低于纯 PP,而表观密度大幅度上

升的现象。

图2是不同木粉用量下 PP / 木粉发泡材料的
泡孔平均直径和泡孔密度,图3是不同木粉用量下
PP / 木粉发泡材料的直径分布。

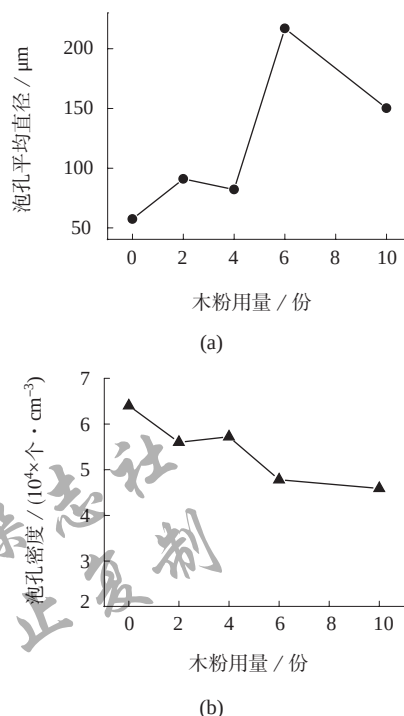
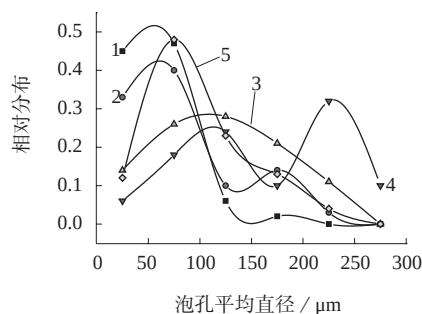


图2 不同木粉用量下 PP / 木粉发泡材料的泡孔平均直径和泡孔密度



木粉用量: 1—0 份; 2—2 份; 3—4 份; 4—6 份; 5—10 份

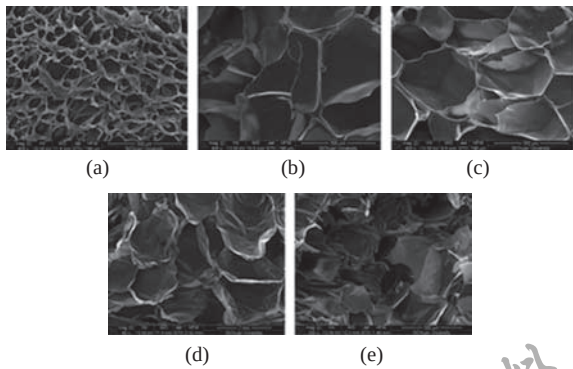
图3 不同木粉用量下 PP / 木粉发泡材料的泡孔平均直径分布

由图2及图3可以看出,在木粉用量较低时,对
PP / 木粉发泡材料的泡孔平均直径影响不是很大,
泡孔孔径略有增大,并且木粉用量为 4 份时,泡孔
平均直径达到 79 μm,泡孔平均直径最均匀,接近
正态分布。当木粉用量为 6 份时,泡孔平均直径
剧增到 234 μm,泡孔孔径分布也不均匀,并且泡
孔平均直径分布主要集中在大孔径区域。可能是
因为更多的木粉用量吸附了更多的 CO₂ 气体,
但是其可供泡孔长大的熔体变少,导致泡孔平均
直径增大,泡孔密

度减少,泡孔分布不均匀。但是,再继续增加木粉用量到 10 份时,改性木粉在基体中的分散性能变差,出现团聚,熔体黏度剧增^[15],致使泡孔无法正常长大而出现泡孔平均直径变小的现象,泡孔平均直径分布更不均匀,并且泡孔平均直径分布主要集中在小孔径区域。由图 2 也可知,泡孔密度随着木粉用量的增加而不断减小。

2.2 木粉用量对 PP/木粉发泡材料断面形貌的影响

不同木粉用量下 PP/木粉发泡材料断面形貌的 SEM 照片如图 4 所示。



木粉用量: a—0 份; b—2 份; c—4 份; d—6 份; e—10 份

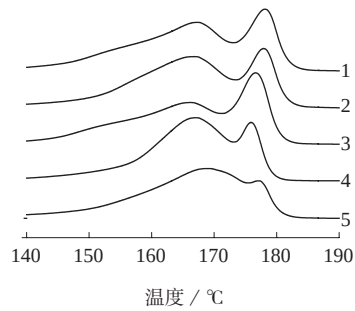
图 4 不同木粉用量下 PP/木粉发泡材料断面形貌的 SEM 照片

由图 4 可知,纯 PP 的泡孔大小不一,泡孔之间的孔壁偏厚,发泡不完善,并且在某些部位出现并孔和坍塌的现象(图 4a)。添加了少量木粉后,泡孔孔径增大,但泡孔形状不均匀,泡孔之间的孔壁偏厚,发泡不完善,并且在某些部位出现坍塌的现象(图 4b)。添加适量木粉后,其泡孔平均直径增大,并且泡孔壁非常薄,结构趋向于标准的正多边形,其发泡效果得到很大改善(图 4c)。继续增加木粉的用量,泡孔结构轮廓渐渐模糊,泡孔间相互合并、挤压,发泡性能变差(图 4d、图 4e)。分析结果与上述结果一致。

2.3 木粉用量对 PP/木粉发泡材料结晶和熔融行为的影响

不同木粉用量下 PP/木粉发泡材料的 DSC 升温曲线如图 5 所示,相应的 DSC 参数列于表 2。

由图 5 可知,整个熔融曲线都表现出高、低两种熔融峰。这是因为 PP 本身拥有较长的长支链,具有可使发泡温度在低于 T_2 时也拥有较大熔融区间的双峰结构,有利于 CO_2 气体的包覆和泡孔的成核及生长。由表 2 可知,随木粉用量的增加,PP/木粉发泡材料的结晶度不断降低,从纯 PP 的 47.8% 降到木粉用量为 10 份时的 33.0%,但熔融温度却没



木粉用量: 1—0 份; 2—2 份; 3—4 份; 4—6 份; 5—10 份

图 5 不同木粉用量下 PP/木粉发泡材料的 DSC 升温曲线

表 2 不同木粉用量下 PP/木粉发泡材料的 DSC 参数

样品编号	木粉用量 / 份	$T_1 / ^\circ\text{C}$	$T_2 / ^\circ\text{C}$	$X_c / \%$
WPC100	0	167.28	178.15	47.8
WPC98	2	166.79	177.89	44.4
WPC96	4	166.21	176.62	39.4
WPC94	6	166.04	175.87	41.9
WPC90	10	165.92	176.06	33.0

注: T_1 、 T_2 分别为起始熔融温度和完全熔融温度。

有多大变化,说明木粉的添加能够部分破坏 PP 的晶体结构,但对熔体强度没多大影响,依旧保持了 PP 双峰结构的特点。这是因为 PP 本身熔体强度很高,木粉的加入很难再提高基体熔体强度。

2.4 POE 用量对 PP/木粉/POE 材料发泡性能的影响

由前述可知,当木粉用量为 4 份时,PP/木粉发泡材料的发泡倍率最高,表观密度最小,泡孔平均直径分布最为均匀,综合发泡性能最佳,所以在木粉用量为 4 份的基础上添加 POE,研究 POE 用量对 PP/木粉/POE 材料发泡性能的影响。不同 POE 用量下 PP/木粉/POE 发泡材料的发泡倍率和表观密度如图 6 所示。

由图 6 可以看出,随着 POE 用量的增加,PP/木粉/POE 发泡材料的发泡倍率缓慢上升,当 POE 用量为 15 份时,获得最佳的发泡倍率,为 14.8 倍,表观密度为 0.06 g/cm^3 ,发泡倍率明显优于前述仅添加 4 份木粉时的 12.6 倍,说明 POE 的添加有效地调节了 PP 的发泡性能。这可能是因为 POE 的熔点比较低,在发泡温度还没有达到 PP 熔点时,与 PP 的非晶区部分产生协同作用,提供足够的熔体区域,提高 CO_2 气体的溶解度,从而改善了 PP 的发泡效果^[16]。当 POE 用量增加到 20 份时,发泡材料的发泡倍率出现严重下降,下降到 8.1 倍,表观密度大幅度上升到 0.113 g/cm^3 。这是因为 POE 的熔体黏度非常低,当 POE 用量达到一定临界值时,会严重降低 PP/木粉/POE 发泡材料的熔体黏度,即使能

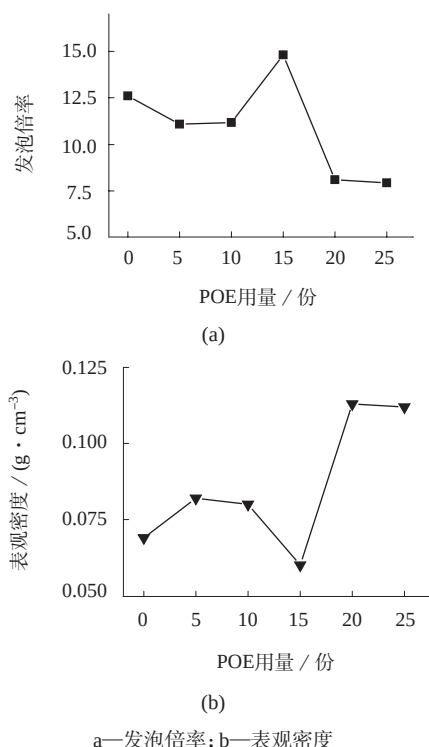


图6 不同 POE 用量下 PP/木粉/POE 发泡材料的发泡倍率和表观密度

够吸附足够多的 CO₂ 气体,但是相应的熔体包覆能力变差,CO₂ 气体可以在很短时间内迅速逃离基体,致使泡孔无法正常长大,出现发泡倍率剧降、表观密度持续上升的现象。

图 7、图 8 分别是不同 POE 用量下 PP/木粉/POE 发泡材料的泡孔平均直径、泡孔密度及直径分布。

由图 7 可知,随着 POE 用量的增加,PP/木粉/POE 发泡材料的泡孔平均直径呈现上升趋势,当 POE 用量为 15 份时,泡孔平均直径为 174 μm ,继续增加 POE 用量,泡孔平均直径稳定在 170 μm 左右,同时添加 POE 的 PP/木粉/POE 发泡材料的泡孔平均直径均高于仅添加木粉的 PP/木粉发泡材料。这主要是因为添加 POE 降低了发泡材料的熔体黏度,提高了 CO₂ 气体的溶解度,致使泡孔孔径增大。同时因为低熔点的 POE 的加入,使得 PP/木粉/POE 发泡材料的可发泡区域除了 PP 基体中的非晶区部分,又增加了 POE 的熔融部分,拓宽了材料的可发泡区域,同时因为体系的熔融黏度降低,木粉周围可以拥有足够的熔体空间聚集更多 CO₂ 气体成核点,最终发展成为泡孔核,提升了发泡材料的泡孔密度。当 POE 用量增加到 15 份后,已经提供足够的空间使得木粉聚集 CO₂ 气体,但是因

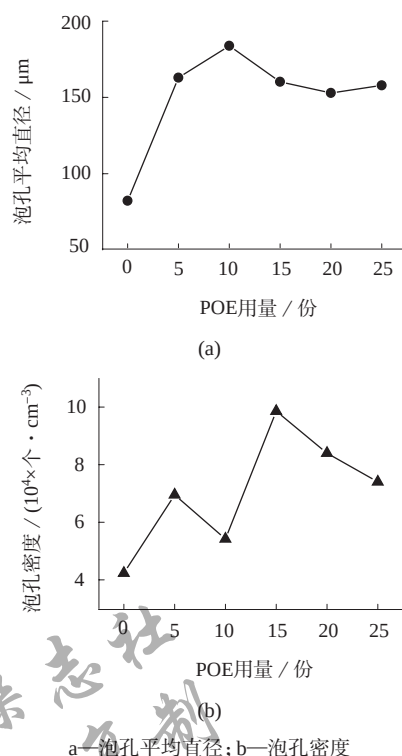
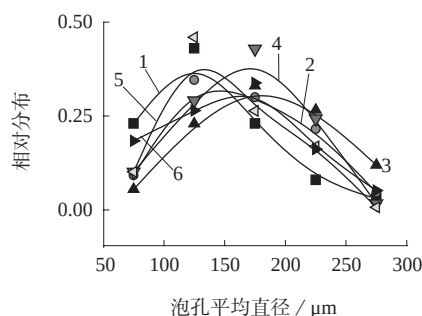


图7 不同 POE 用量下 PP/木粉/POE 发泡材料的泡孔平均直径和泡孔密度



POE 用量: 1—0 份; 2—5 份; 3—10 份; 4—15 份; 5—20 份; 6—25 份

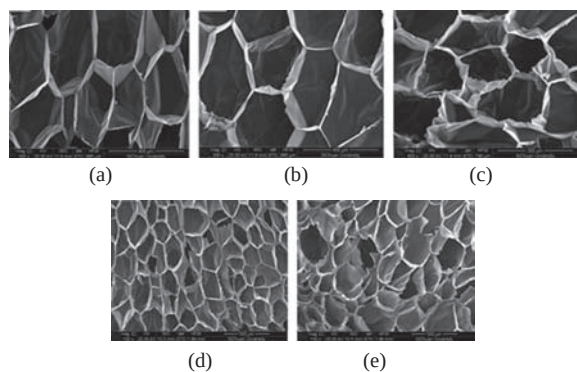
图8 不同 POE 用量下 PP/木粉/POE 发泡材料的泡孔平均直径分布

为熔体黏度继续降低,反而降低了泡孔密度,而泡孔密度总体呈现先增大后降低的现象。从图 8 可以看出,添加 POE 使得泡孔平均直径更为均匀,并且当 POE 含量为 15 份时,泡孔平均直径分布逼近正态分布,获得最佳的发泡性能。

2.5 POE 用量对 PP/木粉/POE 发泡材料断面形貌的影响

不同 POE 用量下 PP/木粉/POE 发泡材料断面形貌的 SEM 照片如图 9 所示。

由图 9 可以看出,所有 PP/木粉/POE 发泡材料的泡孔结构轮廓清晰,孔壁都比较薄,说明发泡效



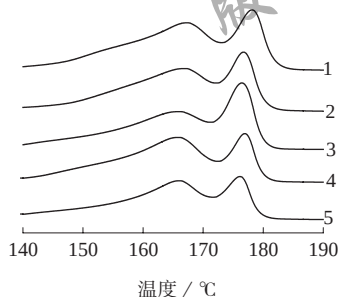
POE 用量: a—5 份; b—10 份; c—15 份; d—20 份; e—25 份

图9 不同 POE 用量下 PP/木粉/POE 发泡材料
断面形貌的 SEM 照片

果相比仅加木粉的 PP/木粉发泡材料有明显的改善。图 9a 中出现了泡孔形状不均匀、发泡不完善的现象;图 9b 和图 9c 中的泡孔结构相比于其它 POE 用量的泡孔结构显得更为完整和均匀;图 9d 和图 9e 中出现了部分泡孔的合并和坍塌现象。这是因为大量的 POE 严重地降低了体系的熔体强度所致。分析结果与上述结果一致。

2.6 POE 用量对 PP/木粉/POE 发泡材料结晶和熔融行为的影响

不同 POE 用量下 PP/木粉/POE 发泡材料的 DSC 升温曲线如图 10 所示,相应的 DSC 熔融参数列于表 3。



POE 用量: 1—0 份; 2—5 份; 3—10 份; 4—15 份; 5—25 份

图10 不同 POE 用量下 PP/木粉/POE 发泡材料的
DSC 升温曲线

表3 不同 POE 用量下 PP/木粉/POE 发泡材料的 DSC 参数

试样编号	POE 用量 / 份	$T_1 / ^\circ\text{C}$	$T_2 / ^\circ\text{C}$	$X_c / \%$
WPC100	0	166.21	176.62	39.4
WPCP95	5	166.93	176.05	40.1
WPCP90	10	166.06	175.95	34.6
WPCP85	15	165.79	175.43	28.8
WPCP75	25	165.96	175.71	24.65

注: T_1 , T_2 分别为起始熔融温度和完全熔融温度。

由图 10 和表 3 可知,随着 POE 用量的增加,PP/木粉/POE 发泡材料的结晶度不断降低,但是起始熔融温度在 166℃左右,完全熔融温度在 176℃

左右,基本保持不变。这是因为 POE 是以海岛结构形式存在于发泡材料中,其 PP 规整度变化不大,只是随着 POE 用量增加,PP 占比减少导致结晶度降低,说明添加 POE 对 PP 高强度熔体的熔融特性影响不大。与未加 POE 的试样 WPC100 相比,添加 POE 的试样的低温吸热焓区域面积更大,使得发泡体系在低温下可以获得更多熔体,有助于 CO_2 气体的溶解度提升和熔体包覆能力的提高,利于泡核的成型和泡孔的生长。

3 结论

(1) 当木粉用量为 4 份时,PP/木粉发泡材料的发泡性能最佳,其发泡倍率最大为 12.6 倍,表观密度最小,为 0.069 g/cm^3 ,泡孔平均直径为 $79 \mu\text{m}$,泡孔平均直径最均匀,接近正态分布,泡孔壁较薄,结构趋向于标准的正多边形。

(2) 当木粉用量为 4 份、POE 用量为 15 份时,PP/木粉/POE 发泡材料的发泡性能最佳,发泡倍率最大,为 14.8 倍,表观密度最小,为 0.06 g/cm^3 ,泡孔平均直径为 $174 \mu\text{m}$,泡孔平均直径更均匀,逼近正态分布,泡孔壁较薄,泡孔结构更为完整和均匀。

(3) 随着木粉用量的增加,PP/木粉发泡材料的泡孔密度和结晶度逐渐减小;随着 POE 用量的增加,PP/木粉/POE 发泡材料的泡孔密度总体呈现先增大后减小的趋势,而结晶度逐渐减小。

参考文献

- [1] 王滨,刘志伟,蒋顶军. 全球汽车轻量化推动发泡聚丙烯的发展[J]. 国外塑料,2013(12):34-38.
Wang Bin, Liu Zhiwei, Jiang Dingjun. Global automotive lightweight promotion of foamed polypropylene[J]. Foreign Plastics, 2013(12):34-38.
- [2] 孟鸿诚,郭鹏,吕明福,等. 高熔体强度聚丙烯的应用及市场分析[J]. 石油化工,2018,47(8):896-900.
Meng Hongcheng, Guo Peng, Lyu Mingfu, et al. Application and market analysis of polypropylene with high melt strength[J]. Petrochemical Industry, 2018, 47(8):896-900.
- [3] 陈明,高山俊,沈春晖. 聚丙烯微发泡材料改性研究进展[J]. 中国塑料,2018,32(5):8-13.
Chen Ming, Gao Shanjun, Shen Chunhui. Research progress on modification of polypropylene microfoaming materials[J]. China Plastics, 2018, 32(5):8-13.
- [4] 宋秉坤,何小芳,康冬冬,等. 发泡聚丙烯的改性及其应用研究[J]. 化工新型材料,2018,46(2):22-25.
Song Bingkun, He Xiaofang, Kang Dongdong, et al. Modification

- and application of foamed polypropylene[J]. New Chemical Materials, 2018, 46(2):22–25.
- [5] 张伟. 高熔体强度聚丙烯发泡材料的制备及性能研究[D]. 合肥: 安徽大学, 2016.
- Zhang Wei. Preparation and properties of high melt strength polypropylene foam[D]. Hefei: Anhui University, 2016.
- [6] Xu Zhimei, Jiang Xiulei, Liu Tao, et al. Foaming of polypropylene with supercritical carbon dioxide[J]. Polymer, 2007, 41:299–310.
- [7] 郭鹏, 吕明福, 吕芸, 等. 聚丙烯发泡材料的研究进展[J]. 石油化工, 2011(6):679–684.
- Guo Peng, Lu Mingfu, Lyu Yun, et al. Research progress in polypropylene foams[J]. Petrochemical Technology, 2011(6):679–684.
- [8] 周吓星, 陈礼辉, 林巧佳. 竹粉/聚丙烯发泡复合材料的增韧效果[J]. 农业工程学报, 2013, 29(2):266–272.
- Zhou Xiaxing, Chen Lihui, Lin Qiaojia. Toughening effect of bamboo flour /polypropylene foamed composite[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2013, 29 (2):266–272.
- [9] 王朝, 李姜, 郭少云. 超临界 CO₂ 下聚丙烯/乙烯-辛烯共聚物共混物微孔发泡材料的制备[J]. 高分子材料科学与工程, 2017, 33(10):108–113.
- Wang Chao, Li Jiang, Guo Shaoyun. Preparation of microcellular polypropylene / poly(octene-ethylene) foams by using supercritical carbon dioxide[J]. Polymer Materials Science & Engineering, 2017, 33(10):108–113.
- [10] Kumar V, Suh N P. A process for making microcellular thermoplastic parts[J]. Polymer Engineering & Science, 1990, 30(20):1 323–1 329.
- [11] Kokta B V, Maldas D, Daneault C, et al. Composites of polyvinyl chloride-wood fibers. III: Effect of Silane as Coupling Agent[J]. Journal of Vinyl and Additive Technology, 1990, 12(3):146–153.
- [12] 胡文涛, 郝长印, 严正. 成型工艺对超临界二氧化碳发泡 HMSPP 结构与性能的影响[J]. 塑料工业, 2017(6):74–79.
- Hu Wentao, Hao Changyin, Yan Zheng. Influence of molding process on structure and properties of HMSPP foams by supercritical carbon dioxide[J]. China Plastics Industry, 2017(6):74–79.
- [13] 杨明警, 严正, 苏旺, 等. 成型工艺对超临界 CO₂ 发泡 PP 结构与性能的影响[J]. 工程塑料应用, 2016, 44(1):62–67.
- Yang Mingjing, Yan Zheng, Su Wang, et al. Influence of molding process on structure and properties of polypropylene foams in supercritical CO₂[J]. Engineering Plastics Application, 2016, 44(1):62–67.
- [14] 熊业志, 王学林, 张荣, 等. 聚丙烯/木粉釜压珠粒发泡研究[J]. 塑料工业, 2016, 44(5):62–65.
- Xiong Yezhi, Wang Xuelin, Zhang Rong, et al. Study on bead foaming of polypropylene/wood flour composites with autoclave method[J]. China Plastics Industry, 2016, 44(5):62–65.
- [15] 王霞, 李浩, 宋永明, 等. 木粉/聚丙烯复合材料的流变性能研究[J]. 西南林业大学学报, 2016(4):145–151.
- Wang Xia, Li Hao, Song Yongming, et al. Research on rheological properties of wood flour/polypropylene composites[J]. Journal of Southwest Forestry University, 2016(4):145–151.
- [16] 钟亚林, 黄汉雄. 基于相形态的微孔发泡 PP/POE 共混物泡孔结构调控[J]. 高分子学报, 2015(6):720–726.
- Zhong Yalin, Huang Hanxiong. Cellular structure manipulation of microcellular pp/poe blends based on phase morphology[J]. Acta Polymerica Sinica, 2015(6):720–726.
- (上接第 30 页)
- 增强聚丙烯[J]. 工程塑料应用, 2017, 45(9):115–119.
- Li Liying, Yang Weijing, Meng Yongzhi, et al. Phosphorus-nitrogen intumescent flame retardant modified glass fiber reinforced polypropylene[J]. Engineering Plastics Application, 2017, 45(9) : 115–119.
- [11] 鲍文波, 季洋, 高苏亮, 等. Orient 系列膨胀阻燃剂在聚丙烯中的应用[J]. 塑料工业, 2013, 41(2):111–114.
- Bao Wenbo, Ji Yang, Gao Suliang, et al. Application of orient intumescent flame retardants on PP[J]. China Plastics Industry, 2013, 41(2) : 111–114.
- [12] 赵杰, 解田. 一种膨胀型阻燃剂阻燃聚丙烯性能的研究[J]. 塑料科技, 2018, 46(6):114–117.
- Zhao Jie, Xie Tian. Study on properties of polypropylene flame retarded by intumescent flame retardant[J]. Plastics Science and Technology, 2018, 46(6) : 114–117.
- [13] 郭建鹏, 孔伟, 杨涛, 等. 新型轻质环保阻燃聚丙烯材料研究[J]. 塑料工业, 2018, 46(6):129–131.
- Guo Jianpeng, Kong Wei, Yang Tao, et al. Study on new lightweight and environmental flame retardant polypropylene[J]. China Plastics Industry, 2018, 46(6) : 129–131.
- [14] 孔伟, 郭建鹏, 朱晓龙, 等. 无卤阻燃连续长玻璃纤维增强 PP 的性能研究[J]. 中国塑料, 2015, 29(5):30–33.
- Kong Wei, Guo Jianpeng, Zhu Xiaolong, et al. Though properties of halogen-free flame-retardant long-glass-fiber-reinforced polypropylene[J]. China Plastics, 2015, 29(5) : 30–33.
- [15] 冯坤豪, 吴樊, 陈美玲, 等. 无卤阻燃聚丙烯的研究进展[J]. 中国塑料, 2015, 29(6):7–12.
- Feng Kunhao, Wu Fan, Chen Meiling, et al. Research advance in halogen-free flame retardant polypropylene[J]. China Plastics, 2015, 29(6) : 7–12.
- [16] 颜龙, 徐志胜. 溴系协效阻燃体系对 PP 阻燃和生烟性能的影响[J]. 工程塑料应用, 2015, 43(7):114–117.
- Yan Long, Xu Zhisheng. Effect of TBAB-Sb₂O₃ and TBAB-Bi₂O₃ on flame retardancy and smoke properties of polypropylene[J]. Engineering Plastics Application, 2015, 43(7) : 114–117.
- [17] 李豪, 何园, 吴燕鹏, 等. 磷-氮膨胀型阻燃剂和溴系阻燃剂复配阻燃聚丙烯的研究[J]. 中国塑料, 2017, 31(7):63–69.
- Li Hao, He Yuan, Wu Yanpeng, et al. Study of flame-retardant polypropylene based on phosphorus-nitrogen intumescent flame retardant and brominated flame retardant[J]. China Plastics, 2017, 31(7) : 63–69.