

doi:10.3969/j.issn.1001-3539.2019.01.009

PP/POE 微发泡材料的制备和性能

陈明,高山俊,巴丽,杨舒逸

(武汉理工大学材料科学与工程学院,武汉 430070)

摘要:以高熔体强度聚丙烯(PP)和乙烯-辛烯共聚物(POE)为主要原料,利用化学发泡法制备了 PP/POE 微发泡材料。研究了 POE 用量对 PP/POE 微发泡材料发泡性能、力学性能的影响;通过研究 PP/POE 微发泡材料的动态力学性能、结晶行为、泡孔结构,确定了 POE 的最佳用量。添加 POE 能改善微发泡材料的动态力学性能,同时将 PP 的结晶峰温度提升 117.01℃,加快了 PP 的结晶过程,为 PP 发泡提供合适的内部条件,有效地减少了发泡时过发泡、并泡现象的产生。当 POE 质量分数为 10% 时,PP/POE 微发泡材料的综合性能达到最优,其缺口冲击强度达到 13.2 kJ/m²,相比未添加 POE 的微发泡材料提升了约 158.8%,泡孔平均直径减小到 60 μm 左右,泡孔密度达到最大值,为 1.19×10⁶ 个/cm³。

关键词:聚丙烯;乙烯-辛烯共聚物;微发泡;化学发泡

中图分类号: TQ325.1+4 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3539(2019)01-0049-06

Preparation and Properties of PP/POE Micro-foamed Materials

Chen Ming, Gao Shanjun, Ba Li, Yang Shuyi

(Institute of Material Science and Engineering, Wuhan University of Technology, Wuhan 430070, China)

Abstract : Polypropylene (PP)/ethylene-octene copolymer (POE) micro-foamed materials were prepared by using high melt strength PP and POE as base resin by chemical foaming. The effects of POE content on the foaming properties and mechanical properties of the micro-foamed materials were investigated. The optimum addition amount of POE was determined by studying the dynamic mechanical properties, the crystallization behavior and the cell structure of the micro-foamed materials. The addition of POE can improve the dynamic mechanical properties of the materials and the crystallization peak temperature of PP is increased to 117.01℃, which accelerates the crystallization process of PP. Therefore, it provides suitable internal conditions for PP foaming, effectively reduces the occurrence of over-foaming and cell merger during foaming. When the mass fraction of POE is 10%, the comprehensive performance of the material is best, and the notch impact strength reaches 13.2 kJ/m², which is 158.8% higher than that of the foamed material without POE. The cell average diameter is reduced to about 60 μm, and the cell density reaches a maximum of 1.19×10⁶ cell/cm³.

Keywords : polypropylene ; ethylene-octene copolymer ; micro-foamed ; chemical foaming

微发泡聚丙烯(PP)材料隔音、隔热性能优异,耐油性能好,具有广阔的应用前景^[1]。但是 PP 熔体强度较低,在发泡时易发生泡孔破裂、并泡等现象,导致发泡质量过低,力学性能较差,影响其大规模生产应用,因此改善发泡质量,获得理想的发泡结构是拓宽其应用领域的重要方法^[2]。微孔发泡材料中,泡孔的分布、密度和尺寸是否均一对材料的性能和应用有直接的影响。提高 PP 发泡时的熔体强度,

增加发泡的成核点,有利于提高材料的发泡性能,降低泡孔直径,增大泡孔密度且分布均匀^[3]。

近年来,PP 发泡复合材料的添加物常以无机填料为主,添加弹性体的研究较少。郝智等^[4]以 PP 和少量乙烯-辛烯共聚物(POE)为基体,添加滑石粉作为成核剂,制备出了发泡材料,但由于添加了滑石粉使材料的力学性能有明显降低。王朝等^[5]同样以 PP 与 POE 作为发泡基体,以超临界二氧化碳

通讯作者:高山俊,博士,教授,主要从事高分子阻燃材料及燃料电池关键材料的研究 E-mail : sjgao@whut.edu.cn

收稿日期:2018-11-13

引用格式:陈明,高山俊,巴丽,等. PP/POE 微发泡材料的制备和性能[J]. 工程塑料应用,2019,47(1): 49-54.

Chen Ming, Gao Shanjun, Ba Li, et al. Preparation and properties of PP/POE micro-foamed materials[J]. Engineering Plastics Application, 2019, 47(1): 49-54.

为物理发泡剂制备了泡孔直径达 10 μm 左右的发泡材料,分析了 PP/POE 共混发泡的机理,并发现随着 POE 用量的增加,发泡温度上升会使泡孔尺寸变大,泡孔密度降低,发泡倍率提高。

目前,利用化学法制备 PP/POE 微发泡复合材料的报道较少,基于此,笔者通过改变加入的 POE 用量,利用化学发泡法制备含有不同组分的发泡材料,在 POE 起到增韧作用的同时,增加熔体发泡时的成核点,加快结晶过程,促进发泡质量的提高。通过材料熔体动态黏弹性测试、力学性能测试、结晶性能测试和内部形貌的表征等测试手段,探究不同用量 POE 对所制备出的微发泡材料的性能和发泡质量的影响,从而确定 POE 的最佳用量。

1 实验部分

1.1 主要原料

PP:S1003,熔体流动速率为 3 g/(10 min),上海赛科石油化工有限公司;

POE:7277,熔体流动速率为 0.8 g/(10 min),美国陶氏化学公司;

低密度聚乙烯 (PE-LD): 607,中国石化燕山石化公司;

偶氮二甲酰胺 (AC): 工业级,市售;

氧化锌、硬脂酸锌: 分析纯,上海阿拉丁生化科技股份有限公司。

1.2 主要仪器及设备

鼓风干燥机: DHG-9070A 型,上海索域设备有限公司;

电子万能试验机: E44.104 型,MTS 系统(中国)有限公司;

悬臂梁冲击试验机: XJJD-5.5 型,承德市考思科学检测有限公司;

双螺杆挤出机: SHJ-30 型,南京杰恩特机电有限公司;

场发射扫描电子显微镜 (SEM): Zeiss Ultra Plus 型,德国蔡司公司;

综合热分析仪: STA449F3 型,德国耐驰公司;

动态剪切流变仪: DHR-2 型,美国 TA 公司;

注塑机: M1200 型,武汉启恩科技发展有限公司;

电子天平: TMP-2,湘仪天平仪器设备公司;

熔体强度仪: Rheotens97,德国 Gottfert 公司。

1.3 样品制备

将 AC 发泡剂放入热鼓风机中于 60 $^{\circ}\text{C}$ 下干燥

约 4 h,将 PE-LD 与 AC 发泡剂(质量比为 9:1)混合均匀,在双螺杆挤出机中挤出造粒,得到发泡母粒,从料筒到模口的温度分别为 90,95,100,110,120,110 $^{\circ}\text{C}$,主机转速为 150 r/min,喂料速度为 10 r/min。将 PP 和 POE 在 75 $^{\circ}\text{C}$ 下真空干燥 8 h,然后按表 1 配方在高速混合器中与发泡母料、氧化锌和硬脂酸锌干混(如表 1 所示),得到发泡前所需的共混物,用注塑机制备发泡样品,注塑温度为 180 $^{\circ}\text{C}$,压力为 80 MPa。

表 1 PP/POE 微发泡复合材料配方

样品编号	PP	POE	发泡母粒	氧化锌	硬脂酸锌
1 [#]	90	0	9	0.8	0.2
2 [#]	85	5	9	0.8	0.2
3 [#]	80	10	9	0.8	0.2
4 [#]	75	15	9	0.8	0.2
5 [#]	70	20	9	0.8	0.2
6 [#]	65	25	9	0.8	0.2

1.4 性能测试与结构表征

拉伸性能按照 GB/T 1040.2-2006 测试,拉伸速率为 5 mm/min。

弯曲性能按照 GB/T 1449-2005 测试,弯曲速率为 2 mm/min。

缺口冲击强度按照 GB/T 1843-2008 测试,缺口类型为 V 型。

表观密度按照 GB/T 6343-2009 测试。

泡孔密度按式 (1) 计算^[6]:

$$N_c = 1910 \times \frac{\rho_r - \rho_f}{\bar{D}_c^3 \times \rho_r} \quad (1)$$

式中: N_c ——单位体积内泡孔数量,个/ cm^3 ;

ρ_r ——树脂密度, g/cm^3 ;

ρ_f ——发泡密度, g/cm^3 ;

$\bar{D}_c$ ——泡孔平均直径, mm。

微观形态观察: 将样品放在液氮中浸泡 30 min,取出后立即淬断,挑选出断面平整的样品,喷金后在 SEM 下观察并拍照。

结晶性能测试: 利用综合热分析仪对样品进行差热扫描量 (DSC) 测试,先以 20 $^{\circ}\text{C}/\text{min}$ 的升温速率使样品升温至 220 $^{\circ}\text{C}$,使样品熔融,然后在 220 $^{\circ}\text{C}$ 恒温 5 min,消除样品的热历史,再以 10 $^{\circ}\text{C}/\text{min}$ 的降温速率使样品降温结晶,得到 DSC 曲线,根据熔融过程的热效应,可以按式 (2) 计算样品的结晶度^[7]:

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

式中: ΔH ——样品的熔融焓;

ΔH_0 ——100% 结晶 PP 的熔融焓,为 207 J/g^[8];

X ——样品中 PP 的质量分数。

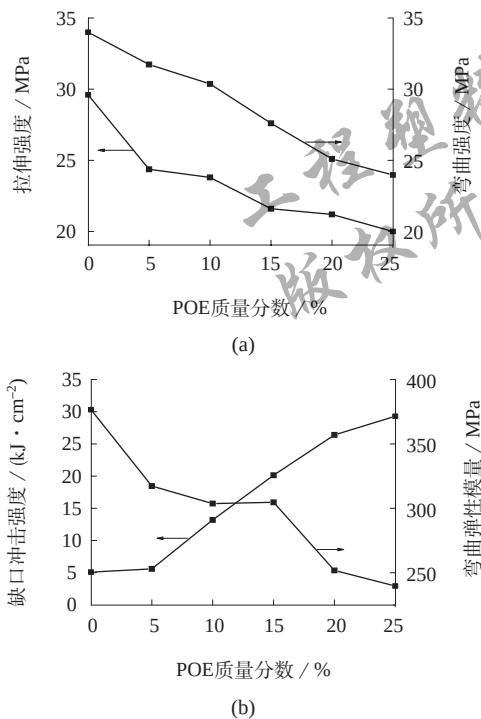
熔体强度测试:使用熔体强度仪测定样品的熔体强度,通过毛细管挤出条带,在空气中测量,牵引加速度为 2.5 mm/s²,夹辊间距 0.9 mm。

动态流变行为测试:扫描角频率范围 0.1~400 rad/s,温度为 180℃,应变为 2%,以 5 Hz 的频率进行扫描。

2 结果与讨论

2.1 POE 用量对微发泡材料力学性能的影响

POE 作为弹性粒子加入到 PP 中时,其最明显的作用是增韧^[9],当材料受到外力作用时,均匀分布在泡孔壁上的 POE 粒子作为应力集中点会在微孔周围诱发银纹和剪切带,吸收部分能量,阻止裂纹扩散^[10],但加入弹性体的弊端同时也显现出来。图 1 是不同 POE 用量下 PP/POE 微发泡材料的力学性能。



a—拉伸强度及弯曲强度;b—缺口冲击强度及弯曲弹性模量

图1 不同 POE 用量下 PP/POE 微发泡材料的力学性能

由图 1a 可知,随着 POE 用量的增加,PP/POE 微发泡材料的拉伸强度和弯曲强度呈减小趋势,其中拉伸强度在 POE 质量分数为 0%~5% 时降幅最大,未添加 POE 时微发泡材料的拉伸强度为 29.60 MPa,添加质量分数 5% 的 POE 后,拉伸强度下降到 24.37 MPa,下降幅度达 17.7%。相比于未添加 POE 的微发泡材料,其拉伸强度下降明显,主

要原因是发泡促进泡孔生成、变大,大量泡孔的存在使材料受力时有效承载面积下降^[11],从而使材料的拉伸强度降低。由图 1b 可知,微发泡材料的弯曲弹性模量随着 POE 用量的增加而逐渐降低,这与拉伸强度的变化趋势相近,主要是因为 POE 作为弹性体存在于材料中,其自身的强度要小于 PP,加上材料内部泡孔的存在,使材料在受到外力时更易发生形变。而微发泡材料的缺口冲击强度随着 POE 用量的增加而大幅增大。未添加 POE 时材料的缺口冲击强度为 5.1 kJ/m²;当 POE 质量分数达到 10% 时,其缺口冲击强度增加 158.8%,达到 13.2 kJ/m²;当 POE 质量分数达到 25% 时,其缺口冲击强度增加 474.5%,达到 29.3 kJ/m²。这是由于一方面除了加入 POE 起到增韧效果外,另一方面是在微发泡材料中,POE 作为成核剂产生的泡孔在材料受到外力作用时会钝化裂纹,阻碍裂纹继续向前发展,泡孔内部会将产生的裂纹分散开,扩展成许多新的小裂纹,若要使这些新的小裂纹继续发展,使材料发生破坏,就需要更多的能量^[12]。从图 1 可以看出,除缺口冲击强度外,添加 POE 使材料其它三项力学性能下降,而当 POE 质量分数大于 10% 时,其它三项力学性能下降幅度增加,因此 POE 用量并不是越多越好,最适宜质量分数为 10%。

2.2 POE 用量对微发泡材料发泡性能的影响

图 2 是不同 POE 用量下 PP/POE 微发泡材料的发泡性能。

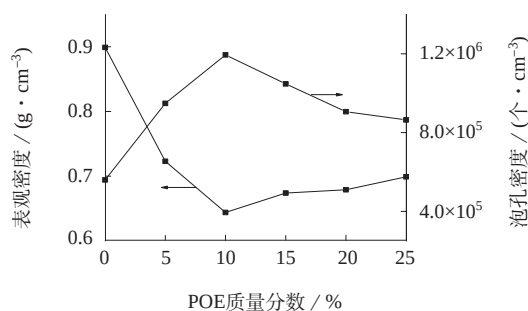
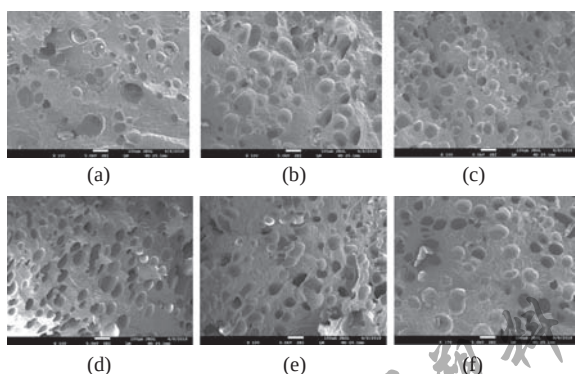


图2 不同 POE 用量下 PP/POE 微发泡材料的发泡性能

由图 2 可以看出,当 POE 质量分数为 10% 时,其作为成核剂的作用最明显,泡孔密度最大,达到了 1.19×10⁶ 个/cm³,相比未添加 POE 时的泡孔密度 5.60×10⁵ 个/cm³,提高了 112.5%,在整个 POE 用量变化过程中,微发泡材料的表观密度与泡孔密度的变化趋势相反,在 POE 质量分数为 10% 时,其表观密度达到最低,为 0.644 g/cm³,对比未添加 POE 时的表观密度 0.899 g/cm³,下降了 28.4%。这不

仅是因为添加了密度较低的 POE,最主要的原因是 POE 具有成核剂的作用,在发泡时提供了大量的异相成核位点,使泡孔密度大大增加,材料的发泡效果更好,泡孔增多,分布更加均匀。最终两种效果的共同作用使微发泡材料的表观密度降低。添加 POE 的微发泡材料的表观密度在 $0.64 \sim 0.73 \text{ g/cm}^3$ 之间,相比未添加 POE 的微发泡材料的表观密度 0.9 g/cm^3 ,其表观密度降低效果明显,有利于微发泡材料的轻量化应用。

图 3 为不同 POE 用量下 PP/POE 微发泡材料断面的 SEM 照片。



POE 质量分数: a—0%; b—5%; c—10%; d—15%; e—20%; f—25%

图 3 不同 POE 用量下 PP/POE 微发泡材料断面的 SEM 照片

由图 3 可知,泡孔 SEM 照片变化与材料发泡后泡孔密度和表观密度的变化趋势相近。不添加 POE 时,微孔发泡材料的发泡效果较差,不仅发泡点较少,同时泡孔并泡现象严重,泡孔大小分布不均,泡孔最大直径甚至达到 $200 \mu\text{m}$,发泡质量较差。添加 POE 后,微孔发泡材料的泡孔结构得到改善,其中当 POE 质量分数为 5% 时,微孔发泡材料的泡孔平均直径减少到 $100 \mu\text{m}$ 左右;当 POE 质量分数为 10% 时,微孔发泡材料的泡孔平均直径最小,为 $60 \mu\text{m}$ 左右,泡孔分散得也较为均匀,几乎没有太大的泡孔缺陷;而随着 POE 用量的继续增加,微孔发泡材料的泡孔平均直径又缓慢增大,当 POE 质量分数为 15% 和 20% 时,微孔发泡材料的泡孔平均直径增大到 $75 \mu\text{m}$ 和 $85 \mu\text{m}$ 左右。在 POE 质量分数为 25% 的微发泡材料中,泡孔直径分布不均匀,平均直径在 $85 \sim 87 \mu\text{m}$ 之间,并泡现象严重,同时泡孔塌陷的现象明显,整个材料呈现过发泡现象。这种现象主要是因为 POE 与 PP 相容性良好^[13], POE 在 PP 熔体中呈现“海岛结构”,当 POE 用量过大时, POE 分散相之间尺寸更小,相互距离更近^[14],虽然有效成核点更多,但成核点之间过于

密集,使发泡时更易产生并泡现象。总的来说,适量的 POE 能很好地发挥成核剂的作用,使泡孔分散均匀,但过量的 POE 反而会降低 POE 的成核效果。

2.3 POE 用量对微发泡材料动态流变行为的影响

PP/POE 微发泡材料的熔体强度列于表 2。由表 2 可以看出,添加 POE 的微发泡材料的熔体强度小于未加 POE 的微发泡材料。这是由于 POE 的熔体强度较低的缘故。随着 POE 用量的增加, PP/POE 微发泡材料的熔体强度总体逐渐增大。这可能是因为随着具有长支链的 POE 用量的增加, POE 与 PP 间分子链的缠结作用变得明显,使熔体在单轴拉伸时,其对分子链运动的阻碍作用增大^[15],导致熔体强度上升。

表 2 不同 POE 用量下 PP/POE 微发泡材料的熔体强度

样品编号	POE 质量分数 / %	熔体强度 / cN
1 [#]	0	13.4
2 [#]	5	11.1
3 [#]	10	11.95
4 [#]	15	11.9
5 [#]	20	12.03
6 [#]	25	12.5

PP/POE 微发泡材料的储能模量 (G')、损耗模量 (G'') 及复数黏度与扫描角频率的关系曲线如图 4 所示。

由图 4a 和图 4b 可知,在整个扫描角频率范围内,熔体的 G' 和 G'' 都随着角频率的增加而上升。由于加入了熔体强度较低的 POE,使得添加 POE 的微发泡材料的 G' 与 G'' 均小于未加 POE 的微发泡材料,当 POE 用量较低时, POE 良好的分散性使 PP 分子链缠结程度降低,因此 G' 与 G'' 均较低;随着 POE 用量的逐渐增加,大量的 POE 粒子之间的相互作用使材料的 G' 与 G'' 上升。由图 4c 可知,随着角频率的增加, PP/POE 微发泡材料的复数黏度逐渐减小。在低频区域,虽然 POE 质量分数为 10% 时微发泡材料的 G' 与 G'' 相比 POE 其它用量时低,但在高频区域, POE 质量分数为 10% 时微发泡材料的 G' 明显提高,出现了明显的“第二平台”现象^[16],表明此时微发泡材料的流变行为出现了类固体行为,该平台特征出现是因为形成了诸如网络、团聚、骨架等高度有序结构^[17],此时 PP/POE 微发泡材料的松弛时间更长,弹性更加显著,黏弹性提高使熔体在发泡时的泡孔结构保持稳定,减少了熔体强度降低而导致的过发泡或并泡的现象,表明当 POE 质量分数为 10% 时, POE 分子链与 PP 分子链之间的相互作用显著,使聚合物熔体的黏弹性能增加。

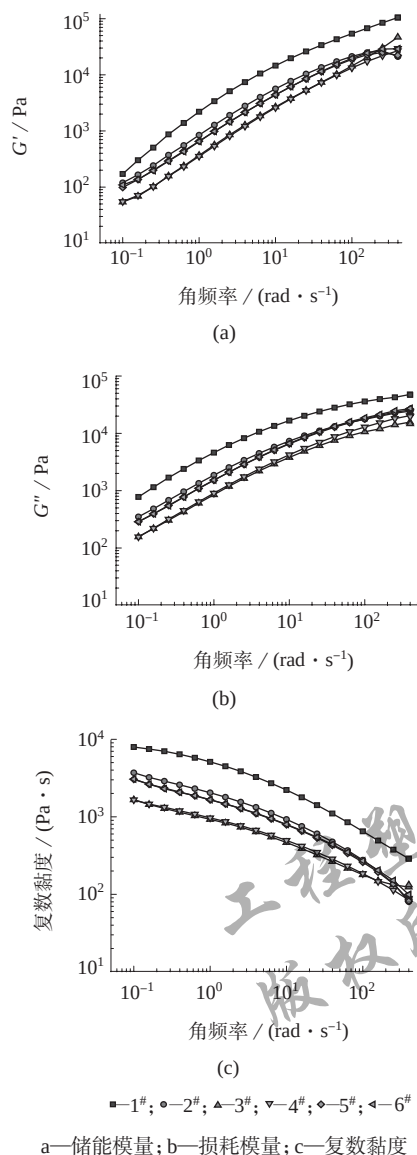


图4 不同POE用量下PP/POE微发泡材料的储能模量、损耗模量及复数黏度与角频率的关系曲线

2.4 POE用量对微发泡材料结晶性能的影响

不同POE用量下PP/POE微发泡材料的DSC曲线如图5所示,相应的DSC数据列于表3。

由图5和表3可以看出,添加POE后,PP/POE微发泡材料的起始结晶温度变化不大,都接近于125℃,结晶峰温度则有所上升,没有添加POE的微发泡材料的结晶峰温度为113.51℃,而添加POE后,微发泡材料的结晶峰温度移向116.5℃左右,在起始结晶温度变化不大的情况下,结晶峰温度移向高温意味着熔融温度范围变窄^[18],其中POE质量分数为10%的微发泡材料的结晶峰温度达到117.01℃,熔融温度范围最窄,导致结晶时间最短。在同等情况下,发泡时间变短使泡孔成核时松弛时

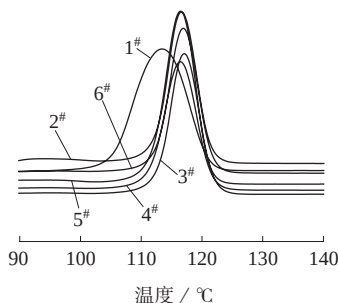


图5 不同POE用量下PP/POE微发泡材料的DSC曲线

表3 不同POE用量下PP/POE微发泡材料的DSC数据

样品编号	POE 质量分数 / %	起始结晶温度 / °C	结晶峰温度 / °C	结晶度 / %
1 [#]	0	125.04	113.51	43.5
2 [#]	5	124.89	116.55	40.9
3 [#]	10	125.20	117.01	33.1
4 [#]	15	125.20	116.50	35.9
5 [#]	20	124.86	116.54	38.2
6 [#]	25	125.03	116.85	30.8

间减少,有利于减少泡孔发生过发泡的概率,同时熔体中添加具有长支链的POE后使PP分子链运动时的摩擦力增加,阻碍了PP分子链结晶时向晶格内的有序排列运动,使发泡时结晶度下降,细小微晶增多。在未添加POE时,微发泡材料的结晶度为43.5%,在添加质量分数10%的POE后,结晶度下降到33.1%,结晶速度的加快与结晶度的下降为PP微发泡提供了良好的内部条件,使熔体强度增加,材料很好地限制了泡孔在长大后期的过发泡而导致泡孔破裂和并泡的现象。综上所述,当POE质量分数为10%时,微发泡材料的泡孔结构最优。这与微发泡材料断面的SEM照片分析结果一致。

3 结论

(1) 添加POE能提高PP/POE微发泡材料的韧性。相比于未添加POE的微发泡材料,当POE质量分数为10%时,材料缺口冲击强度提高158.8%;随着POE用量的增加,材料的拉伸强度、弯曲强度和弯曲弹性模量减小。

(2) POE在PP熔体中的分散性较好,能够很好地起到成核剂的作用,最适宜质量分数为10%;当POE用量继续增加时,则过多的POE在PP熔体中成核点较多,发泡点密集导致泡孔并泡现象增多,使发泡效果下降。

(3) 相比未添加POE的微发泡材料,虽然添加POE使微发泡材料的熔体强度降低,但添加POE质量分数为10%时,微发泡材料出现明显“第二平台”现象,相比POE其它用量的微发泡材料,其熔

体黏弹性增加明显,同时添加 POE 改变了微发泡材料的结晶特性,当 POE 质量分数为 10% 时,在起始结晶温度变化不大的情况下,结晶峰温度上升到 117.01℃,提高了结晶速率,使结晶度下降到 33.1%,这两种作用为 PP 微发泡提供了良好的内部条件,很好地促进了发泡,使泡孔在长大后期的泡孔破裂和过发泡现象得到抑制。

参考文献

- [1] Wang Long, Ishihara S, Ando M, et al. Fabrication of high expansion microcellular injection-molded polypropylene foams by adding long-chain branches[J]. Industrial & Engineering Chemistry Research, 2016, 55(46):11 970–11 982.
- [2] 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(5):8–14.
Chen Ming, Gao Shanjun, Shen Chunhui. Research Progress on Modification of Micro-foamed PP[J]. China Plastics, 2018(5):8–14.
- [3] 刘晶如,胡方明,俞强. 聚丙烯接枝马来酸酐改性纳米 ZnO / 聚丙烯复合材料的成核结晶行为及力学性能[J]. 复合材料学报, 2017, 34(7):1 526–1 532.
Liu Jinru, Hu Fangming, Yu Qiang. Nucleation and crystallization and mechanical properties of nano-ZnO / polypropylene composites modified by maleic anhydride grafted polypropylene[J]. Acta Materialiae Compositae Sinica, 2017, 34(7):1 526–1 532.
- [4] 郝智,唐圣福,刘军,等. PP / POE / 滑石粉复合发泡体系的制备与性能研究[J]. 现代机械, 2008(2):90–92.
Hao Zhi, Tang Shengfu, Liu Jun, et al. Study on the preparation and properties of PP / POE / Talc foam composites[J]. Modern Machinery, 2008(2):90–92.
- [5] 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.
- [6] 吴智华,孙洲渝,唐卓,等. 影响注塑 PP 微孔材料结构的工艺参数[J]. 中国塑料, 2002(9):57–61.
Wu Zhihua, Sun Zhouyu, Tang Zhuo, et al. Process parameters Influencing cell structure of injection molded PP microcellular polypropylene[J]. China Plastics, 2002(9):57–61.
- [7] Wang Mingyi, Xie Linsheng, Qian Bo, et al. Extrusion foaming behavior of a polypropylene / nanoclay microcellular foam[J]. Journal of Applied Polymer Science, 2016, 133(41):doi:10.1002/app.44094.
- [8] Abadchi M R, Jalali-Arani A. Crystallization and melting behavior of polypropylene (PP) in (vulcanized nanoscale polybutadiene rubber powder / PP) polymer-nanocomposites[J]. Thermochimica Acta, 2015, 617:120–128.
- [9] Liang Jizhao, Zhu Bo, Ma Wenyong. Morphology and mechanical properties of PP / POE / nano-CaCO₃ composites[J]. Polymer Composites, 2016, 37(2):539–546.
- [10] 杨芳,刘钰馨,莫美忠,等. 弹性体增韧聚丙烯研究进展[J]. 塑料科技, 2015, 43(4):106–110.
Yang Fang, Liu Yuxin, Mo Xianzhong, et al. Research progress on toughening modification of PP by elastomer[J]. Plastics Science and Technology, 2015, 43(4):106–110.
- [11] 王昌银,段焕德,张纯,等. 纤维对微发泡聚丙烯复合材料发泡行为的影响[J]. 高分子材料科学与工程, 2016, 32(1):131–136.
Wang Changyin, Duan Huande, Zhang Chun, et al. Effect of fiber on foaming behavior of micro-foamed polypropylene composites[J]. Polymer Materials Science and Engineering, 2016, 32(1):131–136.
- [12] 何跃,蒋团辉,刘阳夫,等. 橡胶粒子对微发泡聚丙烯复合材料发泡行为与力学性能的影响[J]. 材料工程, 2017, 45(2):80–87.
He Yue, Jiang Tuanhui, Liu Yangfu, et al. Influence of rubber powders on foaming behavior and mechanical properties of foamed polypropylene composites[J]. Journal of Materials Engineering, 2017, 45(2):80–87.
- [13] 李树白,姚培,刘媛,等. PP / POE 共混物形态结构与逾渗分析[J]. 塑料科技, 2017, 45(11):26–31.
Li Shubai, Yao Pei, Liu Yuan, et al. Analysis of phase morphology and percolation theory for PP / POE blends[J]. Plastics Science & Technology, 2017, 45(11):26–31.
- [14] 袁海兵. POE 增韧改性聚丙烯 / 滑石粉复合材料的研究[J]. 中国塑料, 2018(3):33–36.
Yuan Haibing. Study on polypropylene / talc composite toughened by POE[J]. China Plastics, 2018(3):33–36.
- [15] 李树白,孙毓韬,姚培,等. PP / POE 共混物的流变行为分析[J]. 塑料科技, 2018(4):34–38.
Li Shubai, Sun Yutao, Yao Pei, et al. Rheological Analysis of PP / POE blends[J]. Plastics Science and Technology, 2018(4):34–38.
- [16] 郝明洋,段焕德,张纯,等. 聚丙烯 / 有机蒙脱土复合材料的发泡行为[J]. 高分子材料科学与工程, 2015, 31(10):81–86, 91.
Hao Mingyang, Duan Huande, Zhang Chun, et al. Foaming behavior of polypropylene / organic montmorillonite composites[J]. Polymer Materials Science and Engineering, 2015, 31(10):81–86, 91.
- [17] 倪庆婷,张岳平,叶青,等. HDPE / 纳米 SiO₂ 复合体系的动态流变行为[J]. 常州大学学报:自然科学版, 2014, 26(1):14–17.
Ni Qingting, Zhang Yueping, Ye Qing, et al. Study of dynamic rheological behaviour of HDPE / nano-SiO₂ compound system[J]. Journal of Changzhou University: Natural Science Edition, 2014, 26(1):14–17.
- [18] 熊业志,刘月香,胡圣飞,等. 聚丙烯发泡珠粒的结晶熔融行为与发泡特性[J]. 高分子材料科学与工程, 2016, 32(9):49–53.
Xiong Yezhi, Liu Yuexiang, Hu Shengfei, et al. Melting / crystallization behavior and foaming properties of expanded polypropylene bead[J]. Polymer Materials Science and Engineering, 2016, 32(9):49–53.