

doi:10.3969/j.issn.1001-3539.2016.07.005

PP/纳米 Al_2O_3 复合材料及其发泡材料的制备与表征^{*}

刘伟,张纯,雷泽明,伍玉娇,杨柳涛

(贵州理工学院材料与冶金工程学院,贵阳 550003)

摘要: 用 PP 与纳米 Al_2O_3 熔融共混法制备复合材料,再用超临界 CO_2 间歇发泡法制备发泡材料,并对材料的结晶行为、力学性能、发泡行为和导热性能进行研究。结果表明,纳米 Al_2O_3 能提高复合材料的结晶和熔融温度,但会降低 PP 链段运动能力,当纳米 Al_2O_3 含量为 7% 时,复合材料的结晶度由纯 PP 的 28.10% 降至 24.46%; 纳米 Al_2O_3 具有刚性粒子的增强增韧协同效果,当纳米 Al_2O_3 含量为 5% 时,纳米 Al_2O_3 的骨架效应使得复合材料的拉伸强度达到 33.9 MPa,继续提高其含量后复合材料的拉伸强度略微下降。由于纳米 Al_2O_3 的刚性粒子增韧效果,当纳米 Al_2O_3 含量达到 7% 时,复合材料的冲击强度可达到 5.26 kJ/m²。纳米 Al_2O_3 起到异相泡孔成核剂作用,加入 5% 的纳米 Al_2O_3 后,发泡材料的泡孔密度提高至 2.18×10^7 个/cm³,其热导率在纳米 Al_2O_3 含量为 7% 时达到 0.107 W/(m·K)。

关键词: 聚丙烯; 纳米氧化铝; 发泡材料; 热导率; 力学性能; 结晶行为

中图分类号: TQ328 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3539(2016)07-0025-06

Preparation and Characterization of PP/Nano Al_2O_3 Composites and Its Foams

Liu Wei, Zhang Chun, Lei Zeming, Wu Yujiao, Yang Liutao

(School of Materials and Metallurgical Engineering, Guizhou Institute of Technology, Guiyang 550003, China)

Abstract: Polypropylene (PP)/nano Al_2O_3 composites were prepared by melt mixing, then the composites were foamed by batch-foaming method using supercritical CO_2 as blowing agent. The crystallization behaviors and mechanical properties of the composites as well as the thermal conductivities and foaming behaviors of the foams were studied. The results show that the crystallization temperature and melt temperature of the composites increase with the inducing of nano Al_2O_3 , when nano Al_2O_3 content is 7%, the crystallinity decreases from 28.10% to 24.46% due to the decreasing chain mobility of PP. The tensile and impact strength of the composites are enhanced by adding nano Al_2O_3 , the tensile strength reaches 33.9 MPa when nano Al_2O_3 content is 5%, the impact strength reaches 5.26 kJ/m² when nano Al_2O_3 content is 7%. The cellular morphology and thermal conductivity of PP/nano Al_2O_3 foams are improved by adding nano Al_2O_3 . When nano Al_2O_3 content is 5%, the foam's cell density can reach 2.18×10^7 cell/cm³, and thermal conductivity increases to 0.107 W/(m·K) with addition of 7% nano Al_2O_3 .

Keywords: polypropylene; nano Al_2O_3 ; foam; thermal conductivity; mechanic property; crystallization behavior

近年来,随着高分子发泡技术的快速发展,开发高性能发泡材料成为发展趋势。聚丙烯(PP)发泡材料由于优异的性能,被广泛应用于汽车部件、建筑材料和包装材料等多个领域^[1-3]。然而,PP发泡材料的力学性能,如拉伸强度、拉伸弹性模量等随着发泡倍率的增加而显著降低。研究表明,通过间歇釜压发泡法制备出的低密度PP发泡材料,当发泡密度低于 0.04 g/cm³ 时,其拉伸强度和拉伸弹性模量仅为 4 MPa 和 23 MPa^[4]。另外,发泡材料在散热界面材料和导热包装材料中的需求日益增长,然而,PP发泡材料的热导率低,难以满足使用需求。因此,制备高强度和导热PP发泡材料对其产业化具有重要意义^[5]。

目前,对PP发泡材料的增强和改善热导率的

主要方法有:(1)纤维填充增强法;(2)无机粒子填充增强法;(3)优化泡孔结构增强法。其中,无机粒子增强方法由于简便、高效而备受科研和产业界的关注。无机填料种类较多,其中 Al_2O_3 因较高的刚性和导热性能、低成本和资源丰富特性,成为一种高效的无机填料。 Al_2O_3 改性聚合物的效果受到粒子特性、尺寸、形态和界面结合力的影响。分散均匀的粒子与基体能够形成巨大的界面相,可以同时增强和增韧发泡材料,同时,还能够赋予发泡材料导热、耐磨、阻燃和阻隔气体等性能^[6-7]。杜茂平等^[8]利

^{*} 贵州省科技厅联合基金项目(黔科合 LH 字[2014]7372 号),高层次人才科研启动基金项目(XJGC20141103)

联系人:刘伟,博士,副教授,主要从事聚合物发泡材料研究

收稿日期:2016-04-15

用 Al_2O_3 填充改性聚乙烯,随着 Al_2O_3 含量的增加,粒子间的接触几率增加,当超过临界值时,粒子形成类似网状结构,热量传导效率提高,发泡材料的热导率显著提高。胡祥等^[9]利用表面改性剂对纳米 Al_2O_3 进行化学改性并填充至 PP 基体中,由于粒子分散性的改善,发泡材料的热导率增加 22.3%。

迄今为止,有关 Al_2O_3 改善 PP 发泡材料的力学性能和导热性能的研究较少,特别是 Al_2O_3 对 PP 发泡材料的发泡行为及泡孔微观形态的影响鲜见报道。因此,笔者主要研究 PP/ 纳米 Al_2O_3 复合材料的结晶行为、力学性能,以及发泡材料的导热性能和发泡行为。研究工作的开展对于确定合理的工艺条件、控制高性能 PP 发泡材料的泡孔结构具有重要意义。

1 实验部分

1.1 主要原材料

PP: T30S, 中国石油大庆石化公司;

纳米 Al_2O_3 粉体: DK410-1, 粒子平均粒径和热导率分别为 20 nm 和 30 W/(m·K), 北京德科岛金科技有限公司。

1.2 主要设备及仪器

恒温烘箱: DHG-9245 型, 上海一恒科技有限公司;

密炼机: 60cc 型, 上海科创橡塑机械设备有限公司;

差示扫描量热 (DSC) 仪: Q100 型, 美国 TA 公司;

万能试验机: CMT6104 型, 深圳市新三思计量技术有限公司;

数显冲击试验机: XJZ-50 型, 承德试验机有限责任公司;

扫描电子显微镜 (SEM): Quanta 50 FEG 型, 美国 FEI 公司;

电镜试样喷金设备: EMITECH-K550X 型, 捷克 Tescan 公司;

真密度分析仪: ULTRAPYC 1200e 型, 美国 Quan-tachrome 公司;

超临界 CO_2 间歇发泡装置: 自制;

激光热导率测量仪: LFA-427 型, 德国耐驰公司。

1.3 实验方法

(1) 复合材料的制备。

将 PP 和纳米 Al_2O_3 放置在 60℃ 的烘箱中干

燥 12 h, 以去除原料表面的水分, 并根据表 1 配方中的比例在密炼机中进行熔融共混。共混温度为 190℃, 共混时间为 10 min, 转速为 60 r/min。将熔融共混后的 PP/ 纳米 Al_2O_3 复合材料进行干燥处理, 干燥温度和时间分别为 60℃ 和 8 h, 以备结晶、力学和发泡样品制备使用。

表 1 PP/ 纳米 Al_2O_3 复合材料实验配方

样品编号	PP	纳米 Al_2O_3
纯 PP	100	0
PP- Al_2O_3 -1	99	1
PP- Al_2O_3 -3	97	3
PP- Al_2O_3 -5	95	5
PP- Al_2O_3 -7	93	7

(2) 发泡材料的制备。

PP/ 纳米 Al_2O_3 发泡材料使用超临界 CO_2 高压釜法进行制备。首先将 PP/ 纳米 Al_2O_3 复合材料置于可控温的高压釜内, 升温至 160℃。利用注气泵将超临界 CO_2 注入到高压釜内并达到 15 MPa, 维持 4 h, 使一定量的 CO_2 物理发泡剂充分溶解和均匀扩散于复合材料中, 形成 PP/ CO_2 的均相体系。随后将高压 CO_2 环境快速释放至大气压力, 由于压力降产生均相体系的热力学不稳定状态, 使得溶解在 PP 中的 CO_2 发生相转变并在基体中聚集形成泡孔结构, 得到 PP/ 纳米 Al_2O_3 发泡材料, 放置 48 h 熟化, 供发泡性能和导热性能表征使用。

1.4 性能测试与表征

结晶行为测试: 使用 DSC 仪对 PP/ 纳米 Al_2O_3 复合材料的结晶和熔融行为进行表征。测试条件为 N_2 氛围。将样品快速升温至 200℃ 维持 5 min, 消除热历史, 并以 10℃/min 的冷却速率降温至 40℃, 观察结晶行为, 随后以 10℃/min 的加热速率升温至 180℃, 观察其熔融行为。

拉伸强度测试: 根据 GB/T 1040.1-2006 进行测试, 试验拉伸速率为 5 mm/min, 每种配方至少测试 5 个试样, 并取平均值。

冲击强度测试: 根据 GB/T 1843-2008 进行测试, 测试使用带缺口的简支梁冲击方式, 每种配方至少测试 5 个试样, 并取平均值。

密度测试: 采用真密度分析仪进行测试, 每组样品测试 3 次, 取平均值作为该样品的密度。

泡孔结构表征: 利用 SEM 对 PP/ 纳米 Al_2O_3 发泡材料的泡孔结构进行表征。将发泡样品浸泡在液氮中冷却并淬断, 断面表面喷金, 在放大倍率为 200 倍下观察 PP/ 纳米 Al_2O_3 发泡材料泡体的结构并计算泡孔密度。泡孔密度通过计算机软件 Image

Tool 分析,并通过式 (1) 进行计算:

$$N_c = \left(\frac{n_b}{A}\right)^{3/2} \times \frac{\rho}{\rho_f} \quad (1)$$

式中: N_c ——泡孔密度,个 / cm^3 ;

n_b ——统计面积中的泡孔数量,个;

A ——SEM 照片中所选择的统计面积, cm^2 ;

ρ_f ——发泡后的样品密度, g / cm^3 ;

ρ ——未发泡的样品密度, g / cm^3 。

热导率测试: PP / 纳米 Al₂O₃ 发泡材料的热导率采用激光热导率测量仪进行测试,样品尺寸为 10 mm × 10 mm × 5 mm,每种配方至少测试 5 个样品,并取平均值。

2 结果与讨论

2.1 结晶行为

PP / 纳米 Al₂O₃ 复合材料的升温与降温 DSC 曲线如图 1 和图 2 所示,复合材料的相关热性能数据见表 2。

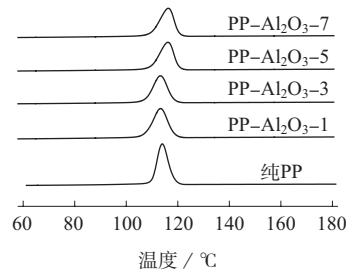


图 1 PP / 纳米 Al₂O₃ 复合材料的降温 DSC 曲线

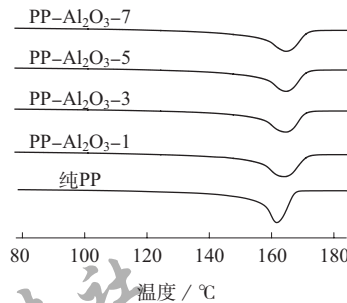


图 2 PP / 纳米 Al₂O₃ 复合材料的升温 DSC 曲线

表 2 PP / 纳米 Al₂O₃ 复合材料的热性能参数

项目	纯 PP	PP-Al ₂ O ₃ -1	PP-Al ₂ O ₃ -3	PP-Al ₂ O ₃ -5	PP-Al ₂ O ₃ -7
$T_c / ^\circ\text{C}$	113.41	113.71	113.93	116.59	116.69
$T_m / ^\circ\text{C}$	161.78	164.51	165.10	164.84	164.83
$\Delta H_m / (\text{J} \cdot \text{g}^{-1})$	58.73	57.37	54.85	52.89	51.13
$X_c / \%$	28.10	27.45	26.24	25.31	24.46

注: T_c 代表结晶峰温度, T_m 代表熔融峰温度, ΔH_m 代表熔融焓, X_c 代表绝对结晶度。

从图 1 和表 2 可以看出,纯 PP 的结晶峰温度在 113.41 $^\circ\text{C}$,且结晶峰型较为尖锐。加入纳米 Al₂O₃ 后,曲线的结晶峰向高温方向移动,当纳米 Al₂O₃ 含量增加至 7% 时,PP / 纳米 Al₂O₃ 复合材料的结晶峰温提高至 116.69 $^\circ\text{C}$ 。结晶峰变宽。这种现象可归因于纳米 Al₂O₃ 填料较大的比表面积有利于提供大量的 PP 结晶成核点,可以大幅降低 PP 结晶所需要的成核活化能。因此,在降温过程中 PP 可以在较高温度下开始结晶,同时拓宽结晶放热峰。从图 2 和表 2 可以看出,纯 PP 的熔融峰温度为 161.78 $^\circ\text{C}$,加入 7% 的纳米 Al₂O₃ 后,PP / 纳米 Al₂O₃ 复合材料的熔融峰温度提高至 164.83 $^\circ\text{C}$ 。在相同的降温速率下,由于加入纳米 Al₂O₃ 后 PP 结晶成核过程比较容易发生,因此在结晶生长过程中,可形成缺陷较少的结晶区域,在升温过程中,熔融过程发生在更高的温度下,此时的熔融过程对 PP 的发泡行为存在影响作用:在 PP 的间歇发泡过程中,发泡温度通常设定在熔融温度和结晶温度之间。熔融温度过低时,PP 的黏弹性低,气体逃逸的速率大,发泡倍率低。反之,提高熔融温度利于扩宽发泡加工窗口,从

而提高泡孔结构的稳定性。

根据式 (2) 计算 PP / 纳米 Al₂O₃ 复合材料的绝对结晶度:

$$X_c = \frac{\Delta H_f}{\Delta H_f^0} \quad (2)$$

式中: X_c ——绝对结晶度;

ΔH_f ——DSC 曲线中 PP 的熔融焓值;

ΔH_f^0 ——PP 在 100% 结晶时的熔融焓值,约为 209 J / $\text{g}^{[10]}$ 。

纯 PP 的结晶能力较强,其结晶度为 28.10%。随着纳米 Al₂O₃ 的加入和含量提高至 7%,复合材料的结晶度小幅度降低至 24.46%。这种现象说明分散在基体中的纳米 Al₂O₃ 颗粒阻碍了降温时 PP 分子链段运动和重排能力,使得分子链折叠排列进入晶格更加困难,因此,复合材料表现出随着纳米 Al₂O₃ 含量增加而结晶度下降的趋势。

2.2 力学性能

图 3 为 PP / 纳米 Al₂O₃ 复合材料的拉伸强度与纳米 Al₂O₃ 含量的关系曲线。

从图 3 可以看出,PP / 纳米 Al₂O₃ 复合材料的

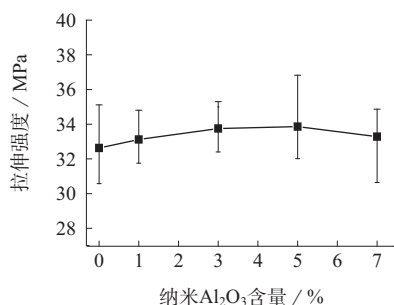


图3 PP/纳米 Al₂O₃ 复合材料的拉伸强度与纳米 Al₂O₃ 含量的关系曲线
拉伸强度随纳米 Al₂O₃ 含量增加而小幅度提高,并在含量为 5% 时拉伸强度达到最高值 (33.9 MPa),当继续提高纳米 Al₂O₃ 含量时,拉伸强度降低。刚性无机粒子对复合体系增强性能的影响主要归因于填料骨架效应和诱导结晶效应。纳米 Al₂O₃ 是典型的刚性粒子,均匀分散在 PP 基体中时表现出增强效果,而且随着其含量的增加其增强效应越显著,所以复合材料的拉伸强度提高^[11]。然而,当纳米 Al₂O₃ 含量继续提高时,PP/纳米 Al₂O₃ 复合材料的结晶度受到纳米 Al₂O₃ 的影响而逐渐下降,导致复合材料的拉伸强度降低^[12]。因此,当纳米 Al₂O₃ 含量达到 7% 时,PP/纳米 Al₂O₃ 复合材料的拉伸强度下降为 33.2 MPa。

图4为PP/纳米 Al₂O₃ 复合材料冲击强度与纳米 Al₂O₃ 含量的关系曲线。

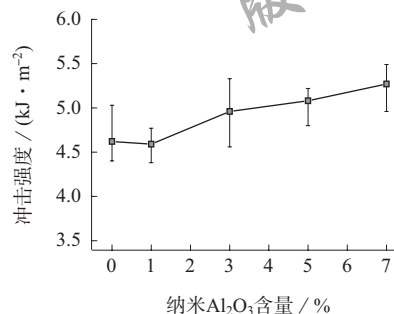


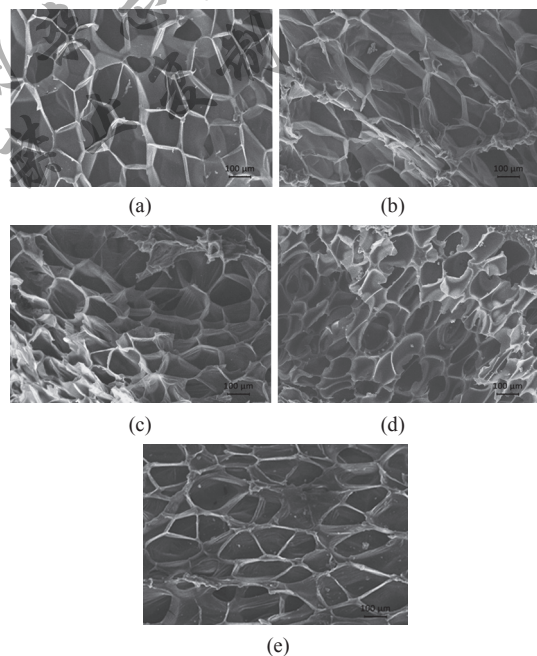
图4 PP/纳米 Al₂O₃ 复合材料的冲击强度与纳米 Al₂O₃ 含量的关系曲线

从图4可以看出,纳米 Al₂O₃ 对 PP 基体具有一定的增韧作用,当纳米 Al₂O₃ 含量达到 7% 时,PP/纳米 Al₂O₃ 复合材料的冲击强度达到 5.26 kJ/m²。根据刚性粒子增韧机理,分散在 PP 基体中的纳米 Al₂O₃ 能够阻碍冲击时裂纹的扩展,因为纳米 Al₂O₃ 粒子在裂纹前端面将发生一定程度的弯曲,这种弯曲使得冲击能量转换为弹性储能,从而起到增韧的效果^[13]。但是刚性粒子增韧又与填料的尺寸、填充量和比表面积等因素相关,根据刚性无机粒子增韧理论,在应力作用下,纳米 Al₂O₃ 颗粒附近的 PP 产

生空穴和微裂纹。由于 PP 基体中空穴和裂纹的存在而产生三维方向的应力松弛,纳米 Al₂O₃ 颗粒附近的应力是相互作用和叠加的效果,这就导致了纳米 Al₂O₃ 颗粒间 PP 基体的屈服,并扩展到整个复合材料发生塑性变形,从而达到增韧的目的^[14]。PP/纳米 Al₂O₃ 复合材料增韧符合“逾渗模型”,体系的脆-韧转变与临界界面厚度有关,随着纳米 Al₂O₃ 颗粒含量的增加,纳米 Al₂O₃ 颗粒表面之间的距离逐渐降低并接近临界界面厚度,形变机理由空穴和微裂纹向 PP 基体剪切屈服转变,断裂模式由脆性断裂向韧性断裂变化^[15]。所以,随着纳米 Al₂O₃ 含量增加,PP/纳米 Al₂O₃ 复合材料表现出更好的增韧效果。

2.3 发泡行为

图5为PP/纳米 Al₂O₃ 发泡材料发泡样品的泡孔微观结构图。



a—纯 PP ; b—PP-Al₂O₃-1 ; c—PP-Al₂O₃-3 ;
d—PP-Al₂O₃-5 ; e—PP-Al₂O₃-7

图5 PP/纳米 Al₂O₃ 发泡材料的泡孔微观形态图

从图5可看出,纯 PP 的泡孔壁完整,为泡孔尺寸分布均匀的五边十二面体结构。加入纳米 Al₂O₃ 后,由于发泡材料的热性能和可发性受到影响,因此泡孔表现出相态结构演变趋势。当纳米 Al₂O₃ 含量低于 3% 时,五边十二面体泡孔结构较为稳定,泡孔壁厚度变化幅度不大,说明在纳米 Al₂O₃ 含量较低时,纳米粒子对泡孔形态的影响不大。当纳米 Al₂O₃ 含量继续提高达到 7% 时,泡孔形态由五边十二面

体泡孔结构逐渐演变为椭球形结构,且泡孔壁厚度略微提高。这是因为纳米 Al₂O₃ 含量过高时,纳米颗粒间的分散性能下降,导致颗粒团聚,容易影响发

泡材料的发泡行为,从而改变 PP 的泡孔结构形态。

PP/ 纳米 Al₂O₃ 发泡材料的泡孔结构参数和导热性能见表 3。

表 3 PP/ 纳米 Al₂O₃ 发泡材料的泡孔结构参数和导热性能

项目	样品编号				
	纯 PP	PP-Al ₂ O ₃ -1	PP-Al ₂ O ₃ -3	PP-Al ₂ O ₃ -5	PP-Al ₂ O ₃ -7
密度/(g·cm ⁻³)	0.092	0.143	0.175	0.243	0.308
发泡倍率	9.98	6.36	5.20	3.74	2.95
泡孔尺寸/μm	112.27	110.65	90.63	89.63	126.37
泡孔密度/(个·cm ⁻³)	1.22×10 ⁷	1.36×10 ⁷	2.48×10 ⁷	2.18×10 ⁷	0.56×10 ⁷
热导率/[W·(m·K) ⁻¹]	0.063	0.070	0.078	0.082	0.107

由于纳米 Al₂O₃ 与 PP 基体的界面结合力较弱,从而会影响 PP 的熔体弹性。由表 3 可以看出,当纳米 Al₂O₃ 含量达到 7% 时,PP/ 纳米 Al₂O₃ 发泡材料的发泡倍率由纯 PP 的 9.98 倍降低至 2.95 倍。此外,纳米 Al₂O₃ 作为 PP 基体中的刚性粒子,其粒子的表面积为泡孔成核提供了大量的异相成核点。这种成核作用在填充 5% 的纳米 Al₂O₃ 时最为显著,此时,PP-Al₂O₃-5 样品的泡孔尺寸降低至 89.63 μm,泡孔密度达到 2.18×10⁷ 个/cm³,相比纯 PP 发泡材料样品,其泡孔密度提高约 1.78 倍。泡孔结构参数的改善有利于提高发泡材料的隔热性能。然而,随着纳米 Al₂O₃ 含量增加并达到 7% 时,泡孔密度值出现下降趋势,这可能与纳米 Al₂O₃ 添加量过高时 PP 基体的熔体弹性变化有关,PP-Al₂O₃-7 样品的泡孔在生长过程中易于合并,导致泡孔密度出现下降。

由表 3 还可以看出,PP/ 纳米 Al₂O₃ 发泡材料热导率的变化趋势说明纳米 Al₂O₃ 对 PP/ 纳米 Al₂O₃ 发泡材料的影响显著。未发泡纯 PP 基体的热导率仅为 0.2 W/(m·K),这是因为纯 PP 基体内部不存在自由电子,热量在传递过程中仅通过晶格振动和声子为载体,而这种导热效率较低^[16]。将 PP 进行超临界 CO₂ 发泡形成泡孔结构后,纯 PP 发泡材料同样表现出低热导率的效果,由表 3 可见,纯 PP 发泡材料的热导率低至 0.063 W/(m·K)。为了改善 PP 发泡材料热导率过低的问题,向体系中加入具有良好导热效果的纳米 Al₂O₃ 颗粒。PP/ 纳米 Al₂O₃ 发泡材料的热导率随着纳米 Al₂O₃ 含量增加而逐渐提高,当纳米 Al₂O₃ 含量达到 7% 时,发泡材料的热导率提高至 0.107 W/(m·K),相比纯 PP 发泡材料提高近 1.70 倍。发泡材料热导率的改善现象可归因于两个方面:第一,纳米 Al₂O₃ 具有良好的导热性[(热导率约为 30 W/(m·K))],纳米 Al₂O₃ 含量增加后有利于提高声子的传递效率,从而提高发泡材料的热导率;第二,纳米 Al₂O₃ 对 PP 的可发

性产生一定影响,随着纳米 Al₂O₃ 含量增加,发泡密度的下降也导致发泡材料热导率提高。在这两种效应的协同作用下,发泡材料的热导率得到改善。

3 结论

(1) 纳米 Al₂O₃ 对 PP 结晶行为影响显著,随着纳米 Al₂O₃ 含量的增加,复合材料的结晶温度提高,当纳米 Al₂O₃ 含量增加至 7% 时,复合材料的结晶温度从纯 PP 的 113.41℃ 提高至 116.69℃,熔融温度由 161.78℃ 提高至 164.83℃。然而,分散在 PP 基体中的纳米 Al₂O₃ 降低了 PP 分子链段运动和排入晶格的能力,导致体系的结晶度由 28.10% 降低至 24.46%。

(2) 纳米 Al₂O₃ 粒子具有显著的刚性粒子的增强增韧效果,纳米 Al₂O₃ 刚性粒子的骨架效应和诱导结晶效应对拉伸强度存在影响作用,当纳米 Al₂O₃ 含量达到 5% 时,复合材料的拉伸强度可达到 33.9 MPa,但是进一步提高纳米 Al₂O₃ 含量,复合材料的拉伸强度下降。另一方面,纳米 Al₂O₃ 存在刚性粒子增韧效果,当纳米 Al₂O₃ 含量达到 7% 时,复合材料的冲击强度提高至 5.26 kJ/m²。

(3) 纳米 Al₂O₃ 对 PP 的泡孔结构参数具有一定的影响,纳米 Al₂O₃ 能够起到泡孔异相成核点的作用,促进泡孔大量成核,因此,当加入 5% 的纳米 Al₂O₃ 时,发泡材料的泡孔密度由纯 PP 发泡材料的 1.22×10⁷ 个/cm³ 提高至 2.18×10⁷ 个/cm³。此外,纳米 Al₂O₃ 可以显著改善发泡材料的热导率,当纳米 Al₂O₃ 含量达到 7% 时,PP/ 纳米 Al₂O₃ 发泡材料的热导率由纯 PP 发泡材料的 0.063 W/(m·K) 提高至 0.107 W/(m·K)。

参考文献

- [1] Lee S, Zhu Lei, Maia J. The effect of strain-hardening on the morphology and mechanical and dielectric properties of multi-layered PP foam/PP film[J]. Polymer, 2015, 70:173-182.
- [2] Feng Jianmin, Wang Weikang, Yang Wei, et al. Structure and prop-

- erties of radiation cross-linked polypropylene foam[J]. Polymer-Plastics Technology and Engineering, 2011, 50(10):1 027-1 034.
- [3] Li Chao, You Feng, Wang Dawei, et al. Preparation and application of expanded polypropylene foam[J]. Polymer Bulletin, 2015, 5:36-41.
- [4] Bao Jinbiao, Junior A N, Weng Gengsheng, et al. Tensile and impact properties of microcellular isotactic polypropylene (PP) foams obtained by supercritical carbon dioxide[J]. The Journal of Supercritical Fluids, 2016, 111:63-73.
- [5] Li Shuzhao, Xiao Miaomiao, Guan Yong, et al. A novel strategy for the preparation of long chain branching polypropylene and the investigation on foamability and rheology[J]. European Polymer Journal, 2012, 48(2):362-371.
- [6] Cimmino S, Silvestre C, Duraccio D, et al. Effect of hydrocarbon resin on the morphology and mechanical properties of isotactic polypropylene / clay composites[J]. Journal of Applied Polymer Science, 2011, 119(2):1 135-1 143.
- [7] Kim E S, Kim E J, Lee T H, et al. Clay modification and its effect on the physical properties of silicone rubber / clay composites[J]. Journal of Applied Polymer Science, 2012, 125(S1):E298-E304.
- [8] 杜茂平, 魏伯荣, 宫大军, 等. 导热绝缘聚乙烯材料的研究[J]. 塑料, 2007, 36(6):32-35.
- Du Maoping, Wei Borong, Gong Dajun, et al. Study on thermal conductive and insulated polyethylene materials[J]. Plastics, 2007, 36(6):32-35.
- [9] 胡祥, 李瑞海. 高导热系数聚丙烯复合发泡材料的制备及研究[J]. 塑料科技, 2012, 40(12):59-64.
- Hu Xiang, Li Ruihai. Study on thermal conductive and insulated polyethylene materials[J]. Plastics Science and Technology, 2012, 40(12):59-64.
- [10] Szkudlarek E, Piorkowska E, Boyer S A E, et al. Nonisothermal shear-induced crystallization of polypropylene-based composite materials with montmorillonite[J]. European Polymer Journal, 2013, 49(8):2 109-2 119.
- [11] Liang Jizhao. Reinforcement and quantitative description of inorganic particulate-filled polymer composites[J]. Composites Part B: Engineering, 2013, 51(4):224-232.
- [12] Liang Jizhao. Quantitative description of interfacial strength in polypropylene / inorganic particle composites[J]. Polymer Composites, 2011, 32(5):821-828.
- [13] Jazi S H S, Bagheri R, Esfahany M N. The effect of surface modification of (micro / nano)-calcium carbonate particles at various ratios on mechanical properties of poly (vinyl chloride) composites[J]. Journal of Thermoplastic Composite Materials, 2015, 28(4):479-495.
- [14] 邹寅将, 生瑜, 朱德钦. 无机刚性粒子增韧聚丙烯的影响因素[J]. 应用化学, 2013, 30(3):245-251.
- Zou Yinjiang, Sheng Yu, Zhu Deqin. Influential factors of toughening polypropylene via the incorporation of inorganic rigid particles[J]. Chinese Journal of Applied Chemistry, 2013, 30(3):245-251.
- [15] 董金虎. 聚合物基复合发泡材料的增强增韧[J]. 中国塑料, 2012(7):20-27.
- Dong Jinhu. Toughening and strengthening of polymeric composites[J]. China Plastics, 2012(7):20-27.
- [16] 闵新民, 安继明, 陈峰, 等. 聚合物基复合发泡材料导热性的研究[J]. 功能材料信息, 2007(4):23-27.
- Min Xinmin, An Jiming, Chen Feng, et al. Study on the thermal conductivity of polymeric composites[J]. Functional Materials Information, 2007(4):23-27.

优惠销售中国工程塑料复合材料技术研讨会《论文集》及论文集光盘

中国合成树脂供销协会加工与应用分会为了配合 2000 ~ 2015 年先后召开的中国工程塑料复合材料技术研讨会, 共编辑、出版了 16 本《论文集》。其内容涉及工程塑料及通用塑料的合成与改性、加工、应用、测试、模具、设备新技术, 以及文献综述、评论等, 突出了我国工程塑料行业发展规划、热点分析。现尚有部分《论文集》, 以及应广大读者要求加工制作的论文集光盘, 现以优惠价格 (含邮费) 销售, 欢迎订阅。

1. 2004 ~ 2015 年中国工程塑料复合材料技术研讨会《论文集》, 优惠价 350 元 / 套。

2. 2000 ~ 2015 年中国工程塑料复合材料技术研讨会论文集光盘, 优惠价 300 元 / 盘。本光盘除收录 2000 ~ 2015 年 16 本《论文集》的全部内容外, 还包括约 3 100 人次的会议代表通讯录。

邮局汇款

收款地址: 山东济南市天桥区田庄东路 3 号

收款单位: 《工程塑料应用》杂志社

邮 编: 250031

电 话: (0531)85878223 85878057 85878278

传 真: (0531)85947355

银行汇款

户 名: 山东非金属材料研究所

开户银行: 济南市工商银行经十一路支行

帐 号: 1602001229014425546

网上订购: <http://www.epa1973.com>