

doi:10.3969/j.issn.1674-7100.2015.02.005

废旧轮胎粉/POE-g-MAH 复合改性 PA6 的制备与性能研究

贺 拓¹, 胡益兴¹, 赵小霞², 魏珊珊¹, 陈宪宏¹

(1. 湖南工业大学 包装新材料与技术重点实验室, 湖南 株洲 412007;

2. 湖南大学 材料科学与工程学院, 湖南 长沙 410082)

摘 要: 以 PA6 为基体、废旧轮胎粉与 POE-g-MAH 为复合增韧剂, 采用双螺杆挤出机, 制备了废旧轮胎粉/POE-g-MAH/PA6 复合材料, 研究了复合增韧剂含量对复合材料力学性能、熔融与结晶行为、晶体结构、热性能以及微观形貌等的影响。结果表明, 复合材料的冲击强度和断裂伸长率随复合增韧剂含量的增加而显著提高, 而拉伸强度和弯曲强度则正好相反; DSC、XRD 和 TGA 结果表明, 复合增韧剂的加入, 提高了 PA6 基体的结晶速率, 却降低了其结晶度、晶体结构的完整性和耐热性能。

关键词: PA6; 废旧轮胎粉; POE-g-MAH; 力学性能; 韧性

中图分类号: TB332

文献标志码: A

文章编号: 1674-7100(2015)02-0021-07

Preparation and Properties of Wasted Tire Powder/POE-g-MAH Compound Modification PA6

He Tuo¹, Hu Yixing¹, Zhao Xiaoxia², Wei Shanshan¹, Chen Xianhong¹

(1. Key Laboratory of New Materials and Technology for Packaging, Hunan University of Technology, Zhuzhou Hunan 412007, China; 2. College of Materials Science and Engineering, Hunan University, Changsha 410082, China)

Abstract: The composites of wasted tire powder/POE-g-MAH/PA6 were prepared based on PA6, wasted tire powder and POE-g-MAH by using twin screw extruder. The effect of elasticizer contents on mechanical properties, melting and crystallization behavior, crystal structure, thermal properties and microstructure of composites were studied. The results showed that the impact strength and elongation at break were significantly increased with increasing contents of the elasticizers, whereas it was contrary for the tensile strength and flexural strength. The DSC, XRD and TGA results showed that the PA6 matrix crystallization rate were increased, while crystallinity, crystal structure integrity and heat resistance were reduced with the addition of elasticizers.

Key words: PA6; wasted tire powder; POE-g-MAH; mechanical properties; toughness

收稿日期: 2014-12-01

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51374102), 湖南省自然科学基金资助项目(14JJ5020)

作者简介: 贺 拓(1990-), 男, 湖南娄底人, 湖南工业大学硕士生, 主要研究方向为高分子材料成型加工与改性,

E-mail: hetuo0803@163.com

通信作者: 陈宪宏(1966-), 男, 湖南汨罗人, 湖南工业大学教授, 博士后, 博士生导师, 主要从事高分子合成与改性以及复合材料方面的教学与研究, E-mail: xianhongchen@hnu.edu.cn

0 引言

带式输送是散装物料运输的主要方式,已被广泛应用于冶金、矿山、煤炭等行业的物料输送^[1]。托辊是带式输送机的心脏部件,其性能的优劣直接影响着带式输送机的运行。目前,国内外生产的托辊主要包括钢制托辊、陶瓷托辊、塑料托辊3种类型^[2],上述3种类型的托辊均存在噪音大、耐磨性能差、质量大、脆性大、使用寿命短等缺陷^[3]。

近年来,用聚合物基复合材料代替传统托辊是该领域研究的重要课题,也是今后发展的主要方向^[4-5]。尼龙6(PA6)是一种通用的工程塑料,具有较高的抗张强度、良好的冲击韧性、较好的消音性能、优良的自润滑和耐磨性能等优点,已被广泛应用于齿轮、轴承等耐磨器件的制造^[6-7]。作为托辊的基材,PA6的力学性能、耐磨性能等不能满足使用要求,同时其价格较高,市场难以接受。目前常用的解决办法是采用纤维对其进行增强改性^[8-9],或使用无机粉体进行填充改性^[10-11],但这会使PA6材料的韧性下降。

随着汽车工业的迅猛发展,废旧橡胶轮胎已被世界公认为“黑色污染”,如何变废为宝是当前科技界和业界十分关注的重要课题^[12]。本研究通过对废旧橡胶轮胎粉进行预处理,然后在POE-g-MAH协助下,将其应用于PA6的改性研究,分析改性剂及其含量对PA6的力学性能、熔融与结晶行为、热稳定性以及微观形貌的影响。

1 实验

1.1 主要原材料

PA6, YH800, 湖南岳化化工股份有限公司生产;
废旧轮胎橡胶粉, 80目, 广州市钟南橡胶再生资源开发有限公司生产;

乙烯-辛烯共聚物(polyolefin elastomer, POE), VM-6202型, 埃克森美孚公司生产;

POE-g-MAH, 按文献[13]中的方法自制, 接枝率为1%。

1.2 实验设备

双螺杆挤出机: CTE-35型, 螺杆直径为30 mm, 长径比为32, 科倍隆科亚(南京)机械有限公司生产;

注塑成型机: HTF90W1型, 宁波海天塑机集团有限公司生产;

万能拉力机, CMT-6000型, 深圳三思纵横科技股份有限公司生产;

悬臂梁冲击试验机, XJC-2225型, 承德精密试验机有限公司生产;

差示扫描量热仪(differential scanning calorimeter, DSC), STA-409C型, 德国NETZCH公司生产;

热重分析仪(thermo gravimetric analyzer, TGA), Q50型, 美国TA公司生产;

X射线衍射(X-ray diffraction, XRD)仪, 6100型, 岛津企业管理有限公司生产;

扫描电子显微镜(scanning electron microscope, SEM), JSM-6510型, 由日本电子株式会社(JEOL)生产。

1.3 样品制备

样品制备的工艺条件为: 双螺杆挤出机各段温度分别控制在190, 200, 210, 220, 210, 200, 230℃, 主机转速为138 r/min, 喂料速度为25 r/min; 注塑成型机各段温度控制在255, 245, 230, 220, 220℃, 螺杆转速为60 r/min。使用前, 将PA6在鼓风干燥箱中于95℃下干燥24 h, POE-g-MAH、废旧橡胶粉于80℃下干燥8 h。样品制备工艺如图1所示。

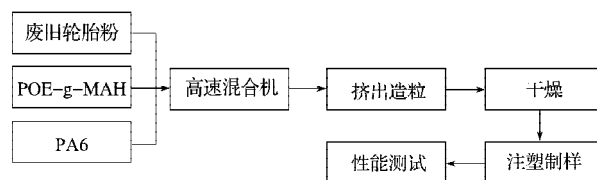


图1 样品制备工艺

Fig. 1 Preparation chart for the samples

1.4 性能测试

采用万能拉力机, 测试样品的拉伸强度和弯曲强度。拉伸强度按GB/T 1040.5—2008《塑料 拉伸性能的测定 第5部分: 单向纤维增强复合材料的试验条件》中的方法测试, 拉伸速度设置为50 mm/min, 环境温度为25℃; 弯曲强度按照GB/T 9341—2008《塑料 弯曲性能的测定》中的方法测试, 速度为2 mm/min, 环境温度为25℃。

采用悬臂梁冲击试验机, 按GB/T 1843—2008《塑料 悬臂梁冲击强度的测定》中的方法, 测试样品的悬臂梁冲击强度, V型缺口, 深度为2 mm, 摆锤冲击能量为11 J。

结晶度通过公式(1)^[14]计算得到。

$$X_c = \frac{\Delta H_m}{\Delta H_m^0} \times 100\% \quad (1)$$

式中: X_c 为聚合物的结晶度, %; ΔH_m 为聚合物试样的熔融热, J/g; ΔH_m^0 为完全结晶试样的熔融热, J/g。文献[15-16]表明, PA6的 ΔH_m^0 为230 J/g。

1.5 表征

采用差示扫描量热仪, 测试试样的熔融状态以及结晶性能。试样的质量为10 mg, 升降温速率为

$\pm 10\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{min}$, 扫描范围为 $25\sim 280\text{ }^{\circ}\text{C}$, N_2 气氛。

采用热重分析仪, 测试复合材料的热稳定性能。试样的质量为 10 mg , 升温速率为 $10\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{min}$, 扫描范围为 $25\sim 500\text{ }^{\circ}\text{C}$, N_2 气氛。

采用X射线衍射仪, 测试试样的晶体结构。测试时的扫描速度为 $10\text{ }^{\circ}/\text{min}$, 扫描范围为 $15\sim 35^{\circ}$; 测试条件为: Cu 靶, $\text{K}\alpha_1$ 线, Ni 滤波; 电压为 40 kV , 电流为 100 mA 。

采用扫描电子显微镜, 测试试样冲击断裂面的表面微观形貌。加速电压为 15 kV , 测试样品为经喷金后的冲击断面。

2 结果与讨论

在查阅大量文献和课题前期实验工作的基础上, 本研究采用质量比 $w(\text{WRP}):w(\text{POE-g-MAH})=6:4$ 的增韧剂体系进行研究。本研究中的百分比含量是指 100 份基体中含有改性剂的份数。

2.1 增韧剂含量对复合材料力学性能的影响

图2为增韧剂添加质量分数对复合材料拉伸强度和弯曲强度的影响曲线。

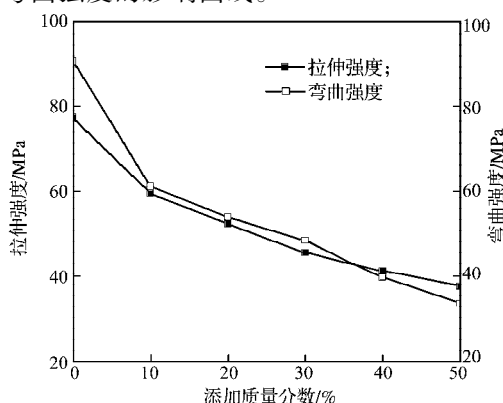


图2 增韧剂添加质量分数对复合材料拉伸强度和弯曲强度的影响

Fig. 2 Effect of elasticizer contents on the tensile strength and the flexural strength of the composites

由图2可以得知, 复合材料的拉伸强度和弯曲强度均随着复合增韧剂添加质量分数的增加而减小, 当增韧剂的添加质量分数小于 10% 时, 曲线下降的幅度较大, 当增韧剂的添加质量分数大于 10% 时, 曲线下降的幅度明显减缓。这是因为: 增韧剂的加入使体系的黏度迅速增大, PA6 分子链进行有序排列变得困难 (即有序排列的速度降低), 导致体系结晶度下降; 增韧剂的加入还起到了在 PA6 结晶过程中的空间阻碍作用, 造成 PA6 分子链在排列过程中的有序性下降, 致使 PA6 晶体结构的规整性变差及完整性降低; 此外, 由于增韧剂本身的拉伸强度和弯

曲强度比 PA6 低很多, 因此导致体系拉伸强度和弯曲强度下降^[17]。增韧剂添加质量分数大于 10% 时, PA6 基体树脂的相对含量进一步减小, 即体系中无定形部分的含量增加, 导致体系的拉伸强度和弯曲强度进一步降低。然而, 由于复合增韧剂添加质量分数的增大, 体系的黏度随之增大, 增韧剂的分散相不易于被分散, 以及分散的均匀性降低^[18]与团聚现象加剧等因素, 导致体系的拉伸强度和弯曲强度下降幅度明显减缓。

图3为增韧剂添加质量分数对复合材料冲击强度 (缺口) 的影响曲线。

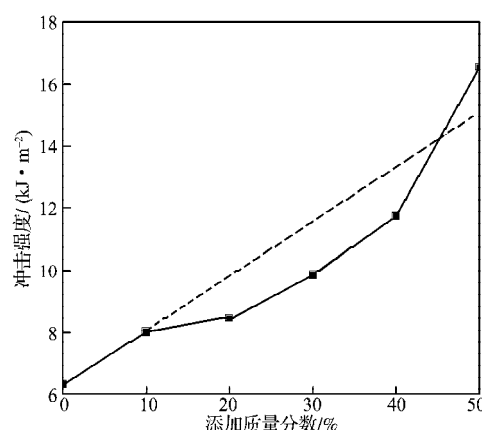


图3 增韧剂添加质量分数对复合材料冲击强度的影响
Fig. 3 Effect of elasticizer contents on the notched impact strength of the composites

由图3可以得知, 所制备的复合材料的冲击强度随着复合增韧剂添加质量分数的增加而增大, 当增韧剂的添加质量分数小于 40% 时, 冲击强度曲线上上升幅度相对较小, 当增韧剂添加质量大于 40% 时, 冲击强度曲线上上升幅度明显增大。这一方面是由于增韧剂中的乙烯-辛烯共聚物本身是低结晶型的弹性体, 主要呈现橡胶的弹性, 废旧轮胎粉在该体系中主要起到填充的作用, 并兼顾部分弹性的贡献作用, 因而复合增韧剂本身具有优良的抗冲击性能, 体系在受到外力的作用下, 能够吸收冲击能量, 从而提高复合材料的冲击强度; 另一方面, 由于废旧轮胎粉颗粒起到了应力集中点的分散作用, 在外力的冲击作用下, 自发诱发大量银纹和剪切带, 消耗掉一部分能量, 体系中的 POE 又能抑制银纹的发展并使银纹及时终止而不致发展成破坏性的裂纹^[19], 因而, 随着增韧剂添加质量分数的增加, 体系的冲击强度也显著提高。随着复合增韧剂添加质量分数的进一步增大 (大于 40%), 体系的冲击强度上升的幅度明显增大。这是由于增韧剂添加质量分数的不断增大, 使体系相态结构由“海-岛”结构逐渐向“海-海”

结构转变,因此冲击强度的提高效果更加显著。当增韧剂添加质量分数为50%时,缺口的冲击强度由原来的6.3 kJ/m²提升到16.5 kJ/m²,提高了约1.6倍。

图4为增韧剂添加质量分数对复合材料断裂伸长率的影响曲线。由图4可知,复合材料的断裂伸长率随着增韧剂添加质量分数的增加逐渐增大,当增韧剂添加质量分数为50%时,复合材料的断裂伸长率由原来的22.1%增至105.9%,增加了约3.8倍。这是由于增韧剂中的POE-g-MAH具有非常窄的分子量分布和均匀的短支链分布^[20],使得复合材料的断裂伸长率得到了较好的改善。

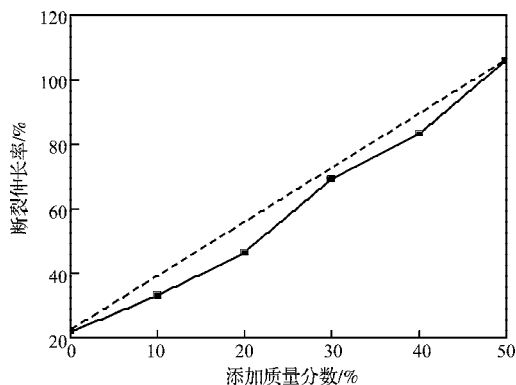


图4 增韧剂添加质量分数对复合材料断裂伸长率的影响

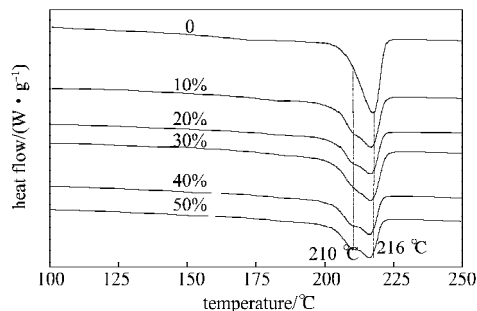
Fig. 4 Effect of elasticizer contents on the elongation at break of the composites

2.2 DSC 分析

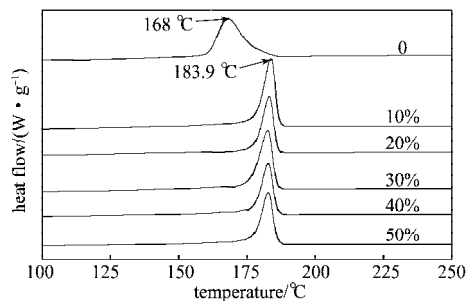
图5为增韧剂添加质量分数对PA6共混物的熔融与结晶行为影响的DSC曲线,其中,升温曲线为消除热历史后的升温曲线。

由图5a的熔融曲线可以看出,纯PA6在216℃左右出现了1个非常明显的熔融峰,添加增韧剂以后的PA6共混物,其熔融曲线上出现了2个熔融峰,即主峰(216℃附近)和肩峰(210℃)。随着增韧剂添加质量分数的增加,主峰和肩峰的位置及峰宽没有观察到明显的变化。肩峰的出现可能是由于增韧剂的添加,使PA6分子链运动受限,分子链排入晶格变得困难,进而使PA6分子链的规整性变差,导致了部分晶体结构的不完善,因而出现了多重熔融峰现象^[21]。由图5b的结晶曲线可以看出,纯PA6在168℃附近出现了1个明显的结晶峰,添加增韧剂以后的PA6,其结晶峰出现在183.9℃附近,与纯PA6相比,其结晶温度提高了约15.9℃,说明增韧剂的加入有利于提高共混物的结晶,这可能是由于增韧剂的加入起到了异相成核剂的作用所致。随着增韧剂添加质量分数的增加,PA6共混物的结晶温度和峰宽没有出现明显的变化,表明增韧剂添加质量分数的大

小对共混体系的结晶温度基本没有影响。由图5b还可以看出,与纯PA6的结晶半宽峰相比,添加增韧剂以后的PA6共混体系,其结晶半宽峰均变小,同时过冷度明显减小,表明增韧剂的加入使PA6的结晶速率加快,结晶度下降^[22]。



a) 升温曲线



b) 降温曲线

图5 增韧剂添加质量分数对复合材料熔融与结晶行为影响的DSC曲线

Fig. 5 Effect of elasticizer contents on melting and crystallization behavior of the composites on the DSC

利用图5所示曲线,计算得到纯PA6和增韧剂添加质量分数对共混物体系的熔融和结晶过程的热性能参数,如表1所示。其中, T_m 为熔融温度,℃; T_c 为结晶温度,℃。从表1中的数据可以看出,随着增韧剂添加质量分数的增加,PA6共混物的熔融热和结晶度均存在不同程度的降低,这与上述分析结果相吻合。

表1 PA6共混物的热性能参数

Table 1 Thermal performance parameters of composites

添加质量分数	$T_m/^\circ\text{C}$	$\Delta H_m/(J \cdot g^{-1})$	$T_c/^\circ\text{C}$	$X_c/\%$
0	217.4	56.3	168.1	24.4
10%	216.7	55.7	183.9	24.2
20%	216.5	48.2	183.2	20.9
30%	216.5	42.4	182.6	18.4
40%	216.2	33.8	182.8	14.6
50%	216.3	30.0	182.8	13.0

2.3 XRD 分析

图6为纯PA6、添加不同质量分数增韧剂的PA6共混物晶体结构的XRD曲线。

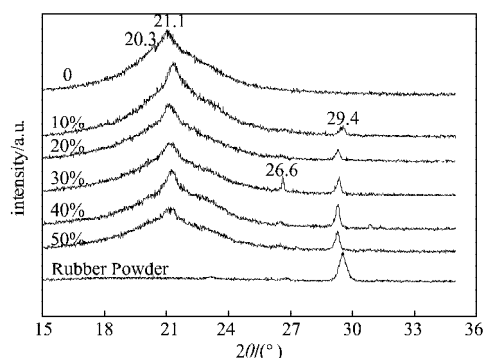


图6 增韧剂添加质量分数对复合材料晶体结构影响的XRD曲线

Fig. 6 Effect of elasticizer contents on crystal structure of the composites on the XRD

由图6可知,纯PA6在 $2\theta=21.1^\circ$ 附近出现了1个较尖锐的 γ 峰,同时在 $2\theta=20.3^\circ$ 附近出现了1个微弱的 α 峰。加入增韧剂后,共混物的 γ 峰位置没有发生明显变动,但其半峰宽随增韧剂添加质量分数的增加呈现逐渐增大的变化趋势,表明加入增韧剂使PA6的晶粒尺寸变小,并随添加质量分数的增加,这种变化趋势逐渐增强^[23-24];同时,在 $2\theta=20.3^\circ$ 附近处的 α 晶型峰在增韧剂添加后逐渐减弱直至消失,表明增韧剂的加入导致PA6中的 α 晶型向 γ 晶型转变。另外,添加增韧剂后的共混物在 $2\theta=29.4^\circ$ 附近及 $2\theta=26.6^\circ$ 附近出现了2个衍射峰,此峰与胶粉的衍射曲线上的峰位置基本重叠,表明其来自于废旧橡胶粉,经与标准图谱库(PDF卡片号为05-0586)比对,这2个峰是 CaCO_3 的衍射峰,可能是由于废旧胶粉中的填料或者是其处理过程中未清洗干净所致。

2.4 TGA分析

耐热性能是材料在使用过程中的一个重要指标,通常采用TGA进行测试。图7为添加不同质量分数增韧剂的PA6混合物的TGA曲线。

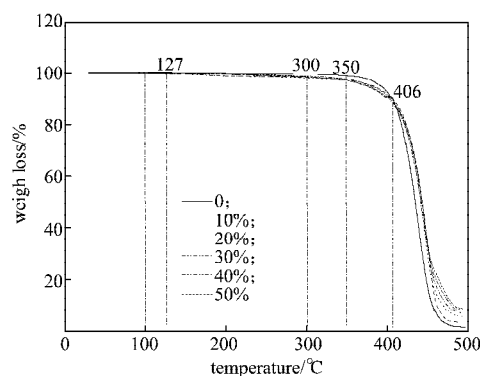


图7 增韧剂添加质量分数对复合材料热稳定性影响的TGA曲线

Fig. 7 Effect of elasticizer contents on thermal stability of the composites on the TGA

由图7可知,纯PA6约在350℃开始热分解。添加增韧剂后的PA6混合物,约在127~280℃区间出现轻微的热失重现象,主要来自于表面吸附水。为准确了解增韧剂添加质量分数的变化对混合物起始分解温度(T_d)的影响,研究组采用同样的方法,对所检测样品的TGA曲线进行单独分析,得到了增韧剂添加质量分数对混合物 T_d 的影响情况,如图8所示。

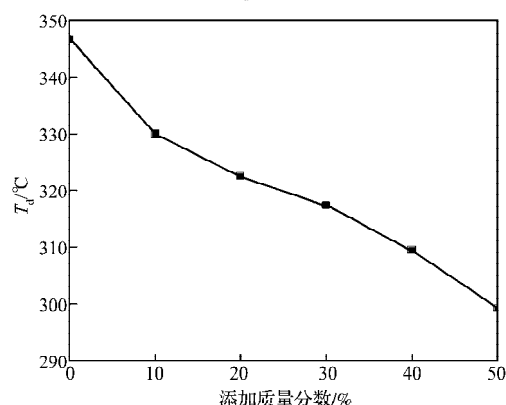


图8 增韧剂添加质量分数对复合材料 T_d 的影响

Fig. 8 Effect of elasticizer contents on the decomposition temperature of the composites

由图8可知,PA6混合物 T_d 随增韧剂添加质量分数的增加而降低,在其添加质量分数小于10%的范围内,下降的幅度较大,当增韧剂添加质量分数大于10%时,下降幅度减缓。这是由于增韧剂的加入在PA6中充当了异相成核的作用,与纯PA6相比,不仅使混合物的结晶度降低,晶体变小,而且阻碍了PA6分子链的有序排列,使其规整性下降,进而导致晶体结构中不规整部位(缺陷)的增加。此外,由于增韧剂主要是无规结构,因此,其加入使PA6分子之间的氢键作用减弱。正是这些因素的共同作用,降低了复合材料的 T_d ^[25],这种共同作用将随着增韧剂添加质量分数的增加而增大。这种共同作用的显著程度在本研究体系中可能是以复合增韧剂添加质量分数10%为界限,因此,当增韧剂添加质量分数大于10%时,复合材料的 T_d 下降幅度减缓。从图7中还可以看出,纯PA6在350℃附近开始出现大规模的热分解或降解现象,而加入增韧剂后的共混物体系大致在300℃左右就出现了大规模的热分解或降解现象,其原因与增韧剂添加质量分数对 T_d 的影响相同。这种变化趋势与前面分析的力学性能、DSC变化规律基本吻合。

2.5 SEM分析

材料的性能最终由其微观形态来决定,因此,对材料的微观形貌研究十分重要。图9为增韧剂不同添加质量分数的样品测试冲击性能后的断面SEM图。

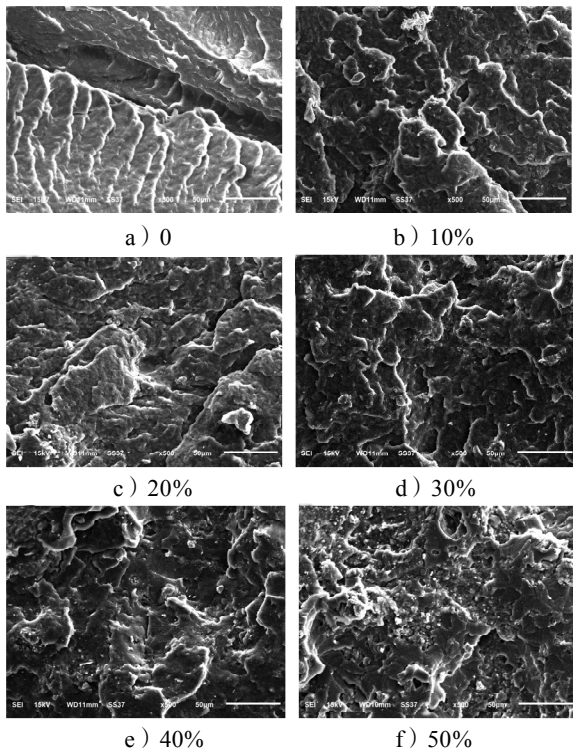


图9 增韧剂不同添加质量分数的复合材料断裂形貌 SEM

Fig. 9 Effect of elasticizer contents on the SEM of the composites

由图9可看出,纯PA6样品的冲击断面(见图a)大部分呈现明显的类似梯形的片层状结构,说明其以脆性断裂为主,本体的拉伸强度较好,另外在中间部分可以看到一条裂缝间隙,其方向与片层状的方向几乎垂直,可能是由于冲击过程外力作用的方向所致,同时也预示其冲击性能不是很好。与纯PA6相比,添加质量分数为10%的增韧剂(见图b)后,断面上梯形的片层状结构显著减少,取而代之的是表面比较平滑、大小不同的呈连续状小块状+丝状的结构,这是较典型的韧性结构特征,且大而宽的裂缝很难观察到。同时,不同小块状结构界面之间没有出现明显的裂纹,说明界面之间的黏结较好,这有利于增韧剂对PA6基体树脂材料韧性的改善。当增韧剂添加质量分数为20%(见图c)时,从冲击断面可以看到,大的块状结构增多,仔细观察,可看到小颗粒的存在,为没有塑化好的废旧轮胎粉粒子;此外,还可以看到裂纹或小裂缝存在,说明随着增韧剂添加质量分数的增加,其在PA6基体中出现分散不均匀以及团聚现象,同时颗粒的数量逐渐增强,这种现象在增韧剂添加质量分数分别为40%和50%的样品(见图e和图f)中表现得尤为明显,同时,类似丝状结构明显增多,说明材料的韧性越来越好。这与力学性能中拉伸强度、冲击强度随增韧剂添加质

量分数的增加所表现的规律相吻合。

3 结论

以PA6为基体、废旧轮胎胶粉和POE-g-MAH为复合增韧剂,研究了复合增韧剂不同添加质量分数对PA6的影响,得到如下结论:

1)体系的冲击强度和断裂伸长率随复合增韧剂含量的增加而显著提高,而拉伸强度和弯曲强度则正好相反。在复合增韧剂添加质量分数为10%时,混合物性能的上升或下降的幅度均较大,此时冲击强度由原来的 6.3 kJ/m^2 增至 8.0 kJ/m^2 ,增加了约27%;断裂伸长率由原来的22.1%增至33.2%,增加了约50%;拉伸强度则由原来的77.2 MPa下降到59.4 MPa,下降了约23%;弯曲强度由原来的90.4 MPa下降到60.9 MPa,下降了约32.6%。

2)DSC、XRD和TGA结果表明,复合增韧剂的加入提高了PA6基体的结晶速率,但使得结晶度、晶体结构的完整性和耐热性能降低。

3)SEM结果显示,复合增韧剂的加入有利于PA6韧性的提高,但当复合增韧剂添加质量分数大于30%时,胶粉在基体中的分散均匀性逐渐变差。

参考文献:

- [1] 宋伟刚. 通用带式输送机设计[M]. 北京: 机械工业出版社, 2006: 18-21.
Song Weigang. Universal Conveyor Design[M]. Beijing: Machinery Industry Press, 2006: 18-21.
- [2] Bahadur S. The Development of Transfer Layers and Their Role in Polymer Tribology[J]. Wear, 2000, 245(1/2): 92-99.
- [3] 张 钺. 新型带式输送机[M]. 北京: 冶金工业出版社, 2001: 101-103.
Zhang Yue. The New Conveyor[M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 2001: 101-103.
- [4] 叶素娟, 禹 权, 黄承亚, 等. 纤维填充PTFE复合材料的摩擦学研究[J]. 塑料工业, 2006, 34(6): 46-49.
Ye Sujuan, Yu Quan, Huang Chengya, et al. Study on Tribology of Fiber Filled PTFE Composite[J]. Plastics Industry, 2006, 34(6): 46-49.
- [5] 雷 毅, 郭建良, 张雁翔, 等. 基于UHMWPE/纳米ZnO复合材料的滑动摩擦磨损机制[J]. 润滑与密封, 2006, 31(4): 36-38.
Lei Yi, Guo Jianliang, Zhang Yanxiang, et al. Sliding Tribological Behavior of Nano-ZnO Filled Ultra High Molecular Weight Polyethylene Composites[J]. Lubrication Engineering, 2006, 31(4): 36-38.

- [6] 钟明强, 孙莉, 贾虹. 尼龙6/纳米 Al_2O_3 复合材料与铜摩擦副的摩擦磨损性能[J]. 工程塑料应用, 2004, 32(6): 8-10.
Zhong Mingqiang, Sun Li, Jia Hong. Nylon 6/ Al_2O_3 Composite Materials and Copper Friction and Wear Properties[J]. Engineering Plastics Application, 2004, 32(6): 8-10.
- [7] 姚洪, 杨寅威, 黄嘉兴. 尼龙6/蒙脱土纳米复合材料的摩擦学特性及磨损机理[J]. 机械工程材料, 2006, 30(9): 64-66.
Yao Hong, Yang Yinwei, Huang Jiaxing. Tribological Performance of Nylon 6/Montmorillonite Composites[J]. Materials for Mechanical Engineering, 2006, 30(9): 64-66.
- [8] 张静, 路琴. 纳米 Si_3N_4 和玻璃纤维混杂增强PA6复合材料的力学性能和摩擦学性能研究[J]. 润滑与密封, 2008, 33(8): 69-71, 74.
Zhang Jing, Lu Qin. Study on Mechanical and Tribological Properties of Polyamide 6 Composites Filled with Nano- Si_3N_4 and Glass Fiber[J]. Lubrication Engineering, 2008, 33(8): 69-71, 74.
- [9] Otaigbe J U, Harland W G. Studies in the Properties of Nylon 6/Glass Fiber Composites[J]. Journal of Applied Polymer Science, 1988, 36(1): 165-175.
- [10] Chang L, Zhang Z, Zhang H, et al. On the Sliding Wear of Nanoparticle Filled Polyamide 66 Composites[J]. Composites Science and Technology, 2006, 66(16): 3188-3198.
- [11] 李国禄, 王昆林, 崔周平, 等. SiC颗粒填充单体浇铸尼龙的摩擦学性能[J]. 清华大学学报: 自然科学版, 2000, 40(4): 111-114.
Li Guolu, Wang Kunlin, Cui Zhouping, et al. SiC Particle Filled Monomer Cast Nylon Tribological Properties[J]. Journal of Tsinghua University: Science and Technology, 2000, 40(4): 111-114.
- [12] 黄发荣. 高分子材料的循环利用[M]. 北京: 化学工业出版社, 2000: 12-15.
Huang Farong. Recycling of Polymer Materials[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2000: 12-15.
- [13] 刘亚庆, 吕孟海, 肖鹏, 等. POE与马来酸酐的反应挤出接枝[J]. 工程塑料应用, 2001, 29(10): 17-19.
Liu Yaqing, Lü Menghai, Xiao Peng, et al. POE Reaction with Maleic Anhydride Extrusion Grafted[J]. Engineering Plastics Application, 2001, 29(10): 17-19.
- [14] 董炎明. 高分子结构与性能[M]. 北京: 中国轻工业出版社, 2009: 164.
Dong Yanming. Polymer Structure and Properties[M]. Beijing: China Light Industry Press, 2009: 164.
- [15] Tol R T, Mathot V B F, Reynaers H, et al. Confined Crystallization Phenomena in Immiscible Polymer Blends with Dispersed Micro- and Nanometer Sized PA6 Droplets Part 4: Polymer Phases Structure and (Meta)-Stability of PA6 Crystals Formed in Different Temperature Regions[J]. Polymer, 2005(46): 2966-2977.
- [16] Wunderlich B. Macromolecular Physics[M]. New York: Academic Press, 1980: 70-71.
- [17] 李小梅, 武德珍, 武立峰. PA6/POE/EAA共混体系的相态与性能的研究[J]. 中国塑料, 2002, 16(8): 27-30.
Li Xiaomei, Wu Dezhen, Wu Lifeng. Research Phase and Properties PA6/POE/EAA Blends[J]. China Plastics, 2002, 16(8): 27-30.
- [18] 刘卫平. PA6/POE超韧合金的形态和性能[J]. 现代塑料加工应用, 1998, 10(3): 8-11.
Liu Weiping. PA6/POE Morphology and Properties of Super-Tough Alloy[J]. Modern Plastics Processing and Applications, 1998, 10(3): 8-11.
- [19] 吴培熙, 张留城. 聚合物共混改性[M]. 北京: 中国轻工业出版社, 2005: 98-103.
Wu Peixi, Zhang Liucheng. Polymer Blending[M]. Beijing: China Light Industry Press, 2005: 98-103.
- [20] 姜兴才, 刘彦昌, 肖维泰. 影响HDPE树脂断裂伸长率的因素及改进措施[J]. 合成树脂及塑料, 1994(11): 48-51.
Jiang Xingcai, Liu Yanchang, Xiao Weitai. HDPE Resins Factors Affecting Elongation at Break and Improvement Measures [J]. China Synthetic Resin and Plastics, 1994(11): 48-51.
- [21] 李磊, 王夏琴, 黄南薰, 等. 尼龙66的多重熔融行为[J]. 中国纺织大学学报, 2000, 26(4): 93-95.
Li Lei, Wang Xiaqin, Huang Nanxuan, et al. Multiple Melting Behavior of Nylon 66[J]. China Textile University Journal, 2000, 26(4): 93-95.
- [22] 张志英, 曹振林. PA6/PET共混物的非等温结晶动力学研究[J]. 合成纤维工业, 1995, 18(6): 14-17.
Zhang Zhiying, Cao Zhenlin. Kinetics of Nonisothermal Crystallization of PA6/PET Blends[J]. China Synthetic Fiber Industry, 1995, 18(6): 14-17.
- [23] 张景春, 谢续明, 郭宝华. 多组分单体接枝聚丙烯尼龙6反应共混物结晶行为研究[J]. 高分子学报, 2002(3): 282-286.
Zhang Jingchun, Xie Xuming, Guo Baohua. Grafted Polypropylene Nylon 6 Multicomponent Reactive Monomer Blend Crystallization Behavior[J]. Acta Polymerica Sinica, 2002(3): 282-286.
- [24] 董炎明. 高分子分析手册[M]. 北京: 中国石化出版社, 2004: 560.
Dong Yanming. Polymer Analysis Handbook[M]. Beijing: China Petrochemical Press, 2004: 560.
- [25] 马德柱. 聚合物结构与性能: 性能篇[M]. 北京: 科学出版社, 2012: 327.
Ma Dezhu. Polymer Structure and Properties: Performance Reviews[M]. Beijing: Science Press, 2012: 327.

(责任编辑: 徐海燕)