

doi:10.3969/j.issn.1001-3539.2018.12.007

近熔点混炼制备 PP/MMT 复合材料的性能

陈荣源,张忠厚,韩琳,闫春绵

(郑州轻工业学院材料与化学工程学院,郑州 450002)

摘要:通过近熔点混炼法制备了不同蒙脱土(MMT)含量的聚丙烯(PP)基复合材料。采用万能试验机测试 PP/MMT 复合材料的拉伸性能,并利用扫描电子显微镜观察试样拉伸断裂形貌,利用 X 射线衍射仪研究 MMT 的插层情况,采用旋转流变仪、锥形量热仪分别表征复合材料的流变性能和燃烧行为。结果表明,随着 MMT 含量的增加,复合材料的拉伸弹性模量不断增加;复合材料的拉伸强度在 MMT 含量为 0.5% 时最大,为 34.5 MPa,较 PP 提高了 15%;复合材料的断裂伸长率在 MMT 含量超过 2% 后出现大幅度降低;复合材料的复数黏度在高频区随频率的增加不断降低,呈现剪切变稀的现象,高含量的 MMT 对复合材料的松弛过程产生了较大的影响;MMT 能够提高复合材料的阻燃性能。

关键词:近熔点混炼;聚丙烯;蒙脱土;复合材料

中图分类号:TQ321 **文献标识码:**A **文章编号:**1001-3539(2018)12-0031-05

Properties of PP / MMT Composites Prepared by Melt Blending Nearby Melting Point

Chen Rongyuan, Zhang Zhonghou, Han Lin, Yan Chunmian

(School of Material and Chemical Engineering, Zhengzhou University of Light Industry, Zhengzhou 450002, China)

Abstract : Polypropylene (PP) / montmorillonite (MMT) composites with different contents of MMT were prepared by melt blending nearby melting point. Tensile properties of the PP / MMT composites were measured by universal tester. The tensile fracture surfaces of the samples were observed by SEM. The intercalation of MMT in the PP matrix was examined by XRD. The rheology properties and burning behavior of the composites were characterized by rotary rheometer and cone calorimeter, respectively. The results showed that the tensile modulus of the composites increased with the increase of MMT content. When the content of MMT was 0.5%, the tensile strength of the composite reached the maximum value 34.5 MPa, which increased about 15% compared with that of pure PP. The elongation at break of the composites began to decrease obviously when the MMT content exceeded 2%. The complex viscosity of the composite decreased with the increase of frequency in high frequency area, which showed the shear thinning behaviors. The MMT would have a major impact on the relaxation process of the composites when MMT content was high. Moreover, the compounding of MMT could improve the flame retardance of the composites.

Keywords : melt blending nearby melting point ; polypropylene ; montmorillonite ; composite

聚丙烯(PP)具有优良的性能,并且价格低廉,是一种重要的通用塑料,广泛应用于日用品、汽车等众多领域。但 PP 依然存在不足,如力学性能、耐热性和阻燃性能难以满足一些使用要求较高的产品,因此导致其在高端领域的应用受到限制。蒙脱土(MMT)是一种具有片层结构的纳米粒子,常用于聚合物改性,能够一定程度上改善聚合物的力学性能、

热性能、阻隔性和阻燃性能等,是制备高性能聚合物复合材料的常用填料。因此,国内外研究者们采用 MMT 改性 PP 在制备高性能 PP 方面取得了一系列的进展,如提高 PP 复合材料的力学性能^[1-3]、结晶及热性能^[4-6]、阻隔性^[7-8]、阻燃性能^[9-10]等。

熔融插层复合法是制备 PP/MMT 复合材料的最简单有效且常用的方法之一^[11-12],而且可直接实

基金项目:郑州轻工业学院博士科研基金项目(2016BSJJ030)

通讯作者:陈荣源,博士,讲师,主要从事高分子材料成型加工、功能高分子材料制备及性能研究 E-mail: rychen@zzuli.edu.cn

收稿日期:2018-09-17

引用格式:陈荣源,张忠厚,韩琳,等.近熔点混炼制备 PP/MMT 复合材料的性能[J].工程塑料应用,2018,46(12):31-35,41.

Chen Rongyuan, Zhang Zhonghou, Han Lin, et al. Properties of PP / MMT composites prepared by melt blending nearby melting point[J]. Engineering Plastics Application, 2018, 46(12):31-35, 41.

现工业化生产,利用挤出机、注塑机等大型设备直接加工成型。而通过熔融共混方法,在高温、高剪切力作用下,会一定程度上使得PP发生降解,黏度降低,不利于MMT的分散、插层和剥离。王德禧教授^[13]针对超高分子量聚乙烯的加工提出了近熔点挤出的概念和方法,其特点之一就是利用低温挤压,减少聚合物大分子的降解,从而提高材料的性能。近熔点混炼加工,是一种低温加工手段(相对于常规加工方法),加工温度在混炼物料的熔点附近,避免了高温(大幅度高于熔点)下大量蓄热导致聚合物热分解的弊端。因此,利用近熔点混炼加工的方法,制备无机粒子填充PP是一种新的加工途径,可以避免PP大分子链的降解,同时强化混炼分散,实现节能降耗。

基于此,笔者利用近熔点混炼加工的方法,制备PP/MMT复合材料,并研究MMT的添加量对复合材料拉伸性能、流变性能和阻燃性能的影响。研究试样拉伸断裂形貌和MMT的插层情况,分析拉伸性能的变化内因;研究复合材料的黏度变化和黏弹行为,分析复合材料的加工流变响应和大分子链松弛过程;利用锥形量热仪表征复合材料的燃烧性能,分析MMT对复合材料阻燃性能的影响。

1 实验部分

1.1 主要原材料

PP:T30S,熔点168℃,熔体流动速率为3.5 g/(10 min),中石化中原石油化工有限公司;

MMT:Nanomer I.44P,美国Nanocor公司。

1.2 主要设备及仪器

哈普转矩流变仪:RM-200C型,哈普电气技术有限公司;

平板硫化机:XLB型,鑫城一鸣橡胶机械公司;

万能试验机:CMT6104型,深圳市新三思计量技术公司;

旋转流变仪:HAAKE Mars III型,美国Thermo Fisher公司;

锥形量热仪:CCT型,昆山莫帝斯科燃烧技术仪器有限公司;

X射线衍射(XRD)仪:D8 ADVANCE型,德国Bruker公司;

扫描电子显微镜(SEM):JSM-6490LV型,日本电子公司。

1.3 试样制备

将PP和MMT分别置于烘箱中在60℃干燥

6 h;然后将PP和一定量的MMT一起加入转矩流变仪混炼,转子转速为40 r/min,混炼时间为6 min;再将混炼得到的各组材料用平板硫化机进行模压制备厚度为2 mm的片材,模压温度为185℃,压力为15 MPa,模压时间为5 min,冷压时间为2 min。MMT质量分数为0,0.5%,1%,2%,3%,5%时的试样分别命名为PP,PP/0.5MMT,PP/1MMT,PP/2MMT,PP/3MMT和PP/5MMT。

1.4 性能测试

拉伸性能测试:测试标准为GB/T 1040.2-2006,试样尺寸为75 mm×4 mm×2 mm,拉伸速率为10 mm/min。

流变性能测试:频率扫描,采用平行板(直径20 mm),测试间隙为1 mm,温度200℃,扫描频率范围为100~0.01 Hz,振幅为1%。

XRD测试:铜靶,镍滤波片,入射线波长0.15418 nm,管压40 kV,管流40 mA,扫描步长0.02°,扫描速度1°/min,狭缝 $D_s=0.5^\circ$, $R_s=8$ mm,测试范围 2θ 为2°~50°,测试试样为模压的1 mm片材。

锥形量热仪测试:热辐射功率为50 kW/m²,样品尺寸为100 mm×100 mm×2 mm。

SEM测试:试样拉伸断面及锥形量热仪测试后的燃烧物进行喷金处理,然后进行观察并拍照。

2 结果与讨论

2.1 拉伸性能及形态

PP/MMT复合材料的拉伸性能随MMT含量的变化曲线如图1所示。从图1可以看出,PP/MMT复合材料的拉伸强度在MMT含量为0.5%时为34.5 MPa,较纯PP提高了15%;当MMT含量为1%~5%时,PP/MMT复合材料的拉伸强度相比纯PP有稍许降低,但较MMT含量为0.5%时复合材料的拉伸强度明显降低。另外,PP/MMT复合材料的拉伸弹性模量随着MMT含量的增加

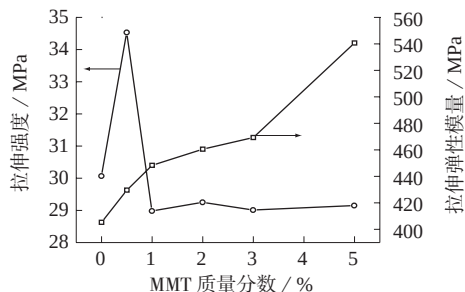


图1 PP/MMT复合材料的拉伸性能随MMT含量的变化曲线

呈现逐渐增加的趋势,在 MMT 含量为 5% 时,复合材料拉伸弹性模量为 541 MPa,较纯 PP 提高了 33.4%;当 MMT 含量超过 3% 后,复合材料的拉伸弹性模量明显增加,这主要是因为无机粒子的填充具有较好的增强作用。

PP/MMT 复合材料的拉伸断裂伸长率随 MMT 含量的变化曲线如图 2 所示。从图 2 可以看出,随着 MMT 含量的增加,PP/MMT 复合材料的断裂伸长率呈降低的趋势,当含量超过 2% 后,断裂伸长率大幅度降低。可见,从增强角度出发,当 MMT 添加量超过 3% 后,复合材料的模量有较大提高,但是断裂伸长率同时出现了明显降低,这主要归结于 MMT 的含量增加导致其在 PP 基体中的分散趋于困难,分散均匀性变差。

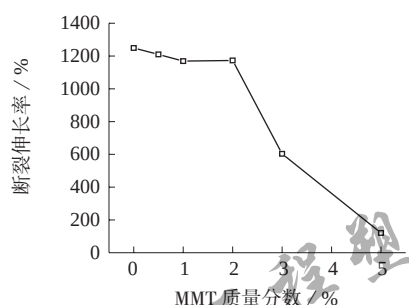


图2 PP/MMT 复合材料的断裂伸长率随 MMT 含量的变化曲线

为了进一步研究 MMT 的加入对 PP 拉伸性能的影响,对纯 PP 和 PP/3MMT 复合材料拉伸断面的形貌微结构进行观察,试样拉伸实验断面的 SEM 照片如图 3 所示。从图 3a 可以看出,纯 PP 的拉伸断面呈现出比较均匀的拉伸带,表面呈现出大量的由于发生大形变断裂后形成的拉丝,拉丝交错缠结形成了网络结构。而 PP/3MMT 复合材料的拉伸断面呈现的拉伸带明显较纯 PP 的宽,而且不均匀,拉丝和网络结构较少,主要是 MMT 的加入阻碍了 PP 柔性链的取向拉伸,而在拉伸实验中,拉伸速率恒定,MMT 一方面阻碍 PP 分子链的运动,另

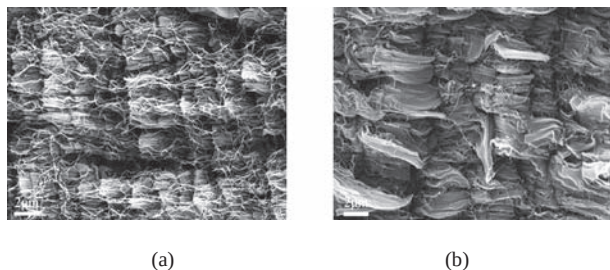


图3 PP 和 PP/3MMT 的拉伸断面 SEM 照片

一方面存在的团聚体也会在 PP 基体中形成局部应力集中点,从而导致复合材料的断裂伸长率明显降低,而模量显著增加。

从 PP/MMT 复合材料的拉伸性能随 MMT 含量变化的曲线可以发现,MMT 含量为 0.5% 时拉伸强度和断裂伸长率相比其它试样都较高,这主要与 MMT 的层状结构有关。图 4 是 MMT, PP/0.5MMT 和 PP/3MMT 的 XRD 曲线,从图 4 可以看出,PP/0.5MMT 和 PP/3MMT 复合材料的 MMT 特征峰都向小角度方向移动,其中 PP/0.5MMT 复合材料的特征峰偏移幅度较大。

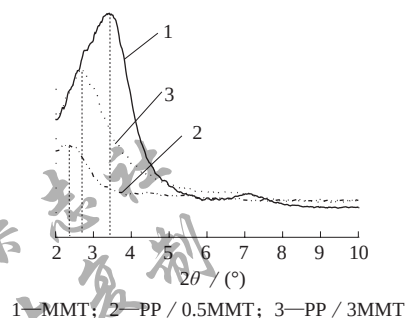


图4 MMT, PP/0.5MMT 和 PP/3MMT 的 XRD 曲线

通过 XRD 计算 MMT 的层间距,采用 Bragg 方程,如式 (1) 所示。

$$2d\sin\theta=n\lambda \quad (1)$$

式中 d 为 MMT 层间距; θ 为衍射峰的衍射角; λ 为入射波的波长; n 为整数,取 1。

通过计算,得到 MMT, PP/0.5MMT 和 PP/3MMT 的 XRD 数据如表 1 所示。从表 1 可以发现,PP/0.5MMT 复合材料中 MMT 的层间距明显增大,也较 PP/3MMT 复合材料中 MMT 的层间距更大,说明 PP/0.5MMT 复合材料中 MMT 的插层效果更好。其原因主要是 MMT 含量较低,在 PP 基体中更易分散,在近熔点强制混炼过程中,更易实现 MMT 的插层,从而更有利于 PP 基体中 MMT 的剥离。MMT 在 PP 基体中较好的插层和剥离,从而使得 PP/0.5MMT 复合材料的拉伸强度较高,而且保持了较高的断裂伸长率。

表1 MMT, PP/0.5MMT 和 PP/3MMT 的 XRD 数据

样品	$2\theta / (^{\circ})$	层间距 d / nm
MMT	3.498	2.526
PP/0.5MMT	2.349	3.761
PP/3MMT	2.687	3.288

2.2 流变性能

材料的流变性能是材料加工成型前需要重点

关注的性能参数。层状结构的 MMT 对复合材料的流变性能具有一定的影响,图 5 是 PP 和 PP/MMT 复合材料的复数黏度 η^* 随频率变化曲线。从图 5 可以看出,在 PP 中加入 MMT 后,在含量不超过 2% 时,复合材料的黏度随频率变化曲线与纯 PP 的基本一致,在低频率时表现出牛顿平台,而后随着频率的增加,复合材料的黏度不断降低,呈现剪切变稀现象。而 PP/3MMT 和 PP/5MMT 复合材料的黏度在整个频率扫描范围内都呈现明显的剪切变稀,而在低频区,黏度都较 PP/2MMT 复合材料增大。表明当复合材料中 MMT 的含量超过 2% 后,MMT 对复合材料的微结构产生了较大影响,可以通过复合材料熔体的黏弹行为来反映。

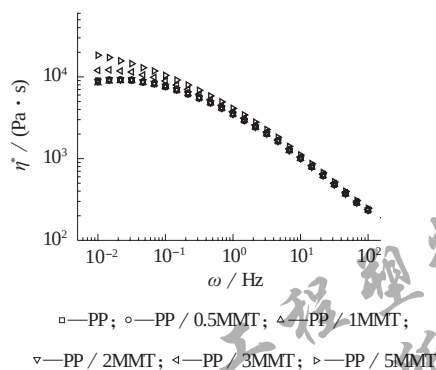


图 5 PP 和 PP/MMT 复合材料的复数黏度 η^* 随频率变化曲线

以材料复数黏度的虚部部分 (η'') 对实部部分 (η') 作图得到 Cole-Cole 曲线,通常用来描述一类具有松弛时间分布材料的黏弹特性^[14-15],图 6 是 PP 和 PP/MMT 复合材料的 Cole-Cole 曲线。从图 6 可以看出,当复合材料中 MMT 的含量不超过 2%,纯 PP 和 PP/MMT 复合材料的 Cole-Cole 曲线都呈现近似半圆弧形,说明 MMT 含量较低时,对 PP 大分子链的松弛过程影响较小。而 PP/3MMT 和 PP

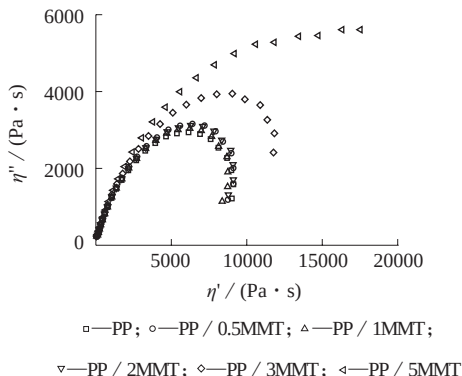
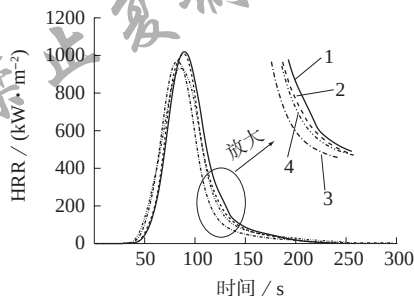


图 6 PP 和 PP/MMT 复合材料的 Cole-Cole 曲线

/5MMT 复合材料的 Cole-Cole 曲线则发生了较大变化,特别是 PP/5MMT 复合材料的 Cole-Cole 曲线的半圆弧形已消失,而是趋向于线形形状,表明随着 MMT 含量的增加,MMT 对复合材料的松弛过程产生了较大的影响。其原因主要是 MMT 含量增加,其对 PP 大分子链的缠结作用增强,MMT 片层及其团聚体会阻碍 PP 大分子链的长程松弛,导致复合材料在应力作用下的松弛时间延长,松弛机理趋于复杂。

2.3 阻燃性能

图 7 是 PP/MMT 复合材料的热释放速率 (HRR) 与时间关系曲线, HRR 是反映材料火灾强度大小以及蔓延速度的重要指标。从图 7 可以看出,随着 MMT 含量的增加, HRR 峰值逐渐降低,说明复合材料在燃烧时的最大热释放程度降低了,从而减少了实际应用中的火灾风险。结果表明, MMT 对 PP 具有一定的阻燃作用。

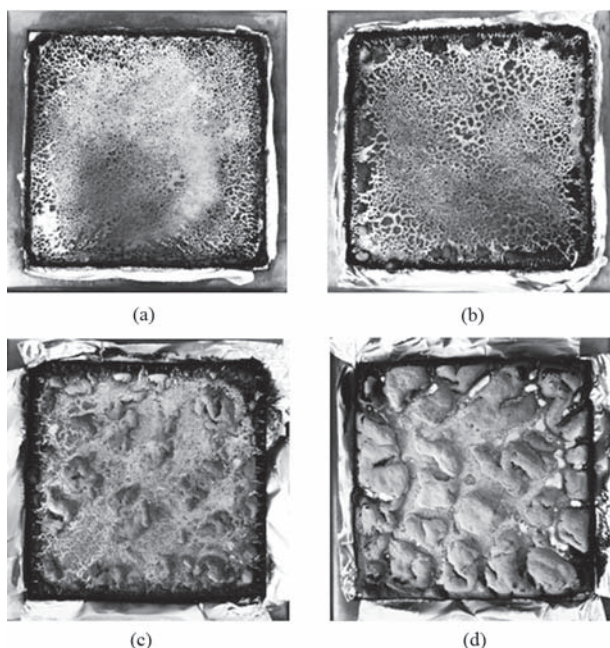


1—PP/0.5MMT; 2—PP/1MMT; 3—PP/3MMT; 4—PP/5MMT

图 7 PP/MMT 复合材料的热释放速率曲线

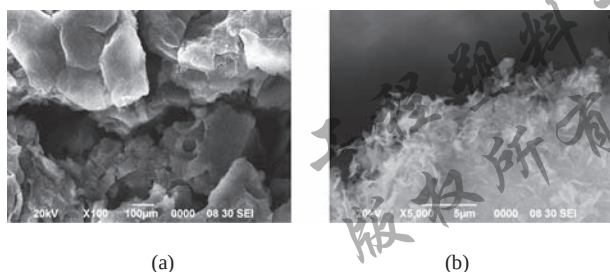
为了进一步研究其阻燃机理,对复合材料燃烧后的物质进行分析。图 8 为不同 MMT 添加量的 PP/MMT 复合材料的燃烧后的剩余物照片。从图 8a 和图 8b 可以看出, PP/0.5MMT 和 PP/1MMT 复合材料的燃烧剩余物较少,由于 MMT 添加量较少,在复合材料燃烧过程中不能起到较好的阻燃作用,燃烧较充分,因此形成的残炭较少。而从图 8c 和图 8d 可以看出, PP/3MMT 和 PP/5MMT 复合材料的燃烧剩余物明显较多,特别是 PP/5MMT 复合材料燃烧后的残炭明显较 PP/3MMT 多。从图 8d 可以看出,残炭表面较均匀,致密。

图 9 为 PP/5MMT 复合材料燃烧后残炭的微观结构 SEM 图。从图 9a 可以看出,残炭内部存在大量褶皱,能够容纳燃烧所致的挥发性气体,起到阻挡小分子及热量的传递。对残炭微结构进行高倍率观察,从图 9b 可以看到,残炭内部存在大量的片层



a—PP/0.5MMT ; b—PP/1MMT ; c—PP/3MMT ; d—PP/5MMT

图8 PP/MMT 复合材料的实验残炭照片



a—放大 100 倍; b—放大 5000 倍

图9 PP/5MMT 复合材料的实验残炭 SEM 照片

结构,这是层状 MMT 在燃烧后留下的剩余物。这些片层结构的 MMT 在复合材料中阻碍热量传递和挥发物的扩散,因此有效提高了复合材料的阻燃性能。

3 结论

(1) 近熔点混炼制备的 PP/MMT 复合材料,随着 MMT 含量的增加,复合材料的拉伸弹性模量不断增加,当 MMT 含量为 5% 时,拉伸弹性模量为 541 MPa,较 PP 提高了 33.4%;复合材料的拉伸强度在 MMT 含量为 0.5% 时最大,为 34.5 MPa,较 PP 提高了 15%;复合材料的断裂伸长率在 MMT 含量超过 2% 后大幅度降低。

(2) MMT 含量不超过 2% 时,复合材料的复数黏度在低频率时表现出牛顿平台,而后随着频率的增加,黏度不断降低,呈现剪切变稀现象,MMT 对 PP 大分子链的松弛过程影响较小;PP/3MMT 和

PP/5MMT 复合材料的黏度在整个频率扫描范围内都呈现明显的剪切变稀,而在低频区,黏度都较 PP/2MMT 复合材料的增大,MMT 对复合材料的松弛过程产生了较大的影响。

(3) 随着 MMT 含量的增加,复合材料的 HRR 峰值逐渐降低,最大热释放程度降低,具有片层结构的 MMT 能够提高复合材料的阻燃性能。综合考虑 PP/MMT 复合材料的力学性能和加工流变性能,当 MMT 含量为 2% 时,复合材料的综合性能较佳,且具备一定的阻燃效果。

参考文献

- [1] Tarapow J A, Bernal C R, Alvarez V A. Mechanical properties of polypropylene / clay nanocomposites:effect of clay content, polymer / clay compatibility, and processing conditions[J]. Journal of Applied Polymer Science, 2009, 111(2):768-778.
- [2] Dobrzański L A, Bilewicz M, Viana J C. Mechanical approach of PP / MMT polymer nanocomposite[J]. Archives of Material Science and Engineering, 2010, 43:94-100.
- [3] 祝宝东,王鉴,于春江,等.聚丙烯基蒙脱土纳米复合材料的结构与性能[J]. 高分子材料科学与工程, 2014(10):58-61.
Zhu Baodong, Wang Jian, Yu Chunjiang, et al. Structure and properties of polypropylene-based nanocomposite materials with montmorillonite[J]. Polymer Materials Science and Engineering, 2014 (10):58-61.
- [4] 聂莹,夏胜利,何晓春. β 晶成核剂与纳米蒙脱土在等规聚丙烯中的协同效应[J]. 工程塑料应用, 2018(2):120-123.
Nie Ying, Xia Shengli, He Xiaochun. Synergistic effect of β -nucleating agent and nano montmorillonite in isotactic polypropylene[J]. Engineering Plastics Application, 2018, 46(2):120-123.
- [5] Shi S, Zhang X, Liu Y, et al. Crystalline modification and morphology of polypropylene developed under the combined effects of montmorillonite and self-assembly β nucleating agent[J]. Composites Science and Technology, 2016, 135:76-82.
- [6] 迟晓红,俞利,郑杰,等.蒙脱土 / 聚丙烯复合材料结晶形态及耐电树枝化特性[J]. 复合材料学报, 2015(1):76-84.
Chi Xiaohong, Yu Li, Zheng Jie, et al. Crystallization morphology and electrical tree resistance characteristics of montmorillonite / polypropylene composites[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2015 (1):76-84.
- [7] 张佳佳,张晓朦,李姜,等.聚丙烯 / 蒙脱土和聚丙烯 / 石墨烯交替多层材料的结构与气体阻隔性能[J]. 高分子材料科学与工程, 2017, 33(9):35-38.

(下转第 41 页)

- separation using dimethyl sulfoxide (DMSO) as solvent[J]. *Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials*, 2016, 62:417–427.
- [8] Khairatun N M A, Pratheep K A, Darren M. Cellulose nanocrystals with enhanced thermal stability reinforced thermoplastic polyurethane[J]. *Malaysian Journal of Analytical Sciences*, 2017, 21(3):754–761.
- [9] 马驰,孙明月,纪汉锋,等. 四脚状氧化锌晶须/热塑性聚氨酯复合材料力学和电性能研究[J]. *当代化工*, 2018(7):1 328–1 331.
- Ma Chi, Sun Mingyue, Ji Hanfeng, et al. Study on mechanical and electrical properties of T-ZnO/TPU composites[J]. *Contemporary Chemical Industry*, 2018(7):1 328–1 331.
- [10] 袁毅,崔爽,徐绍虎,等. 玄武岩纤维增强聚合物基复合材料的研究进展[J]. *合成材料老化与应用*, 2018(4):99–103.
- Yuan Yi, Cui Shuang, Xu Shaohu, et al. Research progress of basalt fiber reinforced polymer matrix composites[J]. *Synthetic Materials Aging and Application*, 2018(4):99–103.
- [11] 武卫莉,王毅文. 玄武岩短纤维增强硅橡胶/氟橡胶复合材料的力学性能及热稳定性能[J]. *合成橡胶工业*, 2018(2):99–103.
- Wu Weili, Wang Yiwen. Mechanical property and thermal stability of basalt chopped fiber reinforced silicone rubber / fluorine rubber composites[J]. *China Synthetic Rubber Industry*, 2018(2):99–103.
- [12] Varley R J, Tian W, Leong K H, et al. The effect of surface treatments on the mechanical properties of basalt - reinforced epoxy composites[J]. *Polymer Composites*, 2013, 34(3):320–329.
- [13] Liying Z, Sunanda R, Ye C, et al. Mussel-inspired polydopamine coated hollow carbon microspheres, a novel versatile filler for fabrication of high performance syntactic foams[J]. *ACS Appl Mater Interfaces*, 2014, 6(21):18 644–18 652.
- [14] 贺建芸,张建文,刘亚康,等. 短纤维-TPU 复合材料力学性能理论与实验研究 (I) 拉伸强度理论与实验 [J]. *北京化工大学学报:自然科学版*, 1999, 26(4):49–52.
- He Jianyun, Zhang Jianwen, Liu Yakang, et al. Theoretical prediction and experimental research on the mechanical properties of short fiber-thermoplastic polyurethane composite (I) Longitudinal strength prediction and experimental research[J]. *Journal of Beijing University of Chemical Technology:Natural Science Edition*, 1999, 26(4):49–52.
- [15] 贺建芸,张连凯,刘亚康,等. 短纤维-TPU 复合材料力学性能理论与实验研究 (II) 弹性模量理论预测及实验 [J]. *北京化工大学学报:自然科学版*, 2000, 27(1):49–52, 55.
- He Jianyun, Zhang Liankai, Liu Yakang, et al. Theoretical and experimental studies on the mechanical properties of short fiber-TPU (II) Theoretical predication and experimental study on modulus of elasticity[J]. *Journal of Beijing University of Chemical Technology:Natural Science Edition*, 2000, 27(1):49–52, 55.
- [16] Mondragon G, Santamaria-Echart A, Hormaiztegui M E V, et al. Nanocomposites of waterborne polyurethane reinforced with cellulose nanocrystals from sisal fibres[J]. *Journal of Polymers and the Environment*, 2018, 26(5):1 869–1 880.
- European Polymer Journal, 2007, 43(8):3 250–3 257.
- [12] Qin H, Zhang S, Zhao C, et al. Thermal stability and flammability of polypropylene / montmorillonite composites[J]. *Polymer Degradation and Stability*, 2004, 85(2):807–813.
- [13] 黄学祥,韩勇,严为群,等. UHMWPE 的近熔点挤出技术及制品性能与应用 [J]. *工程塑料应用*, 2006, 34(11):45–49.
- Huang Xuexiang, Han Yong, Yan Weiqun, et al. Extrusion processing of UHMWPE nearby melting point and performance and application of the products[J]. *Engineering Plastics Application*, 2006, 34(11):45–49.
- [14] Cole K S, Cole R H. Dispersion and absorption in dielectrics I. Alternating current characteristics[J]. *The Journal of Chemical Physics*, 1941, 9(4):341–351.
- [15] Chen R, Zou W, Zhang H, et al. Thermal behavior, dynamic mechanical properties and rheological properties of poly(butylene succinate) composites filled with nanometer calcium carbonate[J]. *Polymer Testing*, 2015, 42:160–167.

(上接第 35 页)

Zhang Jiajia, Zhang Xiaomeng, Li Jiang, et al. Structure and gas barrier properties of polypropylene / montmorillonite and polypropylene / graphene alternating multilayered composites[J]. *Polymer Materials Science and Engineering*, 2017, 33(9):35–38.

- [8] Zehetmeyer G, Scheibel J M, Soares R M D, et al. Morphological, optical, and barrier properties of PP / MMT nanocomposites[J]. *Polymer Bulletin*, 2013, 70(8):2 181–2 191.
- [9] Tang Y, Hu Y, Wang S, et al. Intumescent flame retardant-montmorillonite synergism in polypropylene-layered silicate nanocomposites[J]. *Polymer International*, 2003, 52(8):1 396–1 400.
- [10] Hu Y, Tang Y, Song L. Poly(propylene) / clay nanocomposites and their application in flame retardancy[J]. *Polymers for Advanced Technologies*, 2006, 17(4):235–245.
- [11] Shi D, Yu W, Li R K Y, et al. An investigation on the dispersion of montmorillonite (MMT) primary particles in PP matrix[J].