复合材料学报 第31卷 第4期 8月 2014年
Acta Materiae Compositae Sinica Vol. 31 No. 4 August 2014

文章编号：1000-3851(2014)04-0937-07

离子聚合物改性木粉/HDPE复合材料流变特性

李晶晶[1]，宋湛谦[*1]，李大纲[2]，商士斌[1]，郭 勇[3]

（1. 中国林业科学研究院 林产化学工业研究所，南京 210037；2. 南京林业大学 材料科学与工程学院，南京 210037；
3. 安徽农业大学 林学与园林学院，合肥 230000）

摘 要： 为了提高木塑复合材料(WPC)的加工流动性能，利用离子聚合物改性WPC，通过HAAKE Minilab微量混合流变仪研究了离子聚合物改性木粉/高密度聚乙烯(HDPE)的毛细管流变特征。结果表明：添加与未添加离子聚合物的木粉/HDPE均为非牛顿流体中的假塑性流体，均呈现出“剪切变稀”的效应；随着钠离子聚合物含量的增加，改性木粉/HDPE的剪切应力和表观黏度均随着剪切速率的增大呈现降低的趋势，表明钠离子聚合物的加入可以显著改善聚合物熔体的流动特性；添加4wt%的钠离子聚合物和4wt%的锌离子聚合物的木粉/HDPE剪切应力和表观黏度均要低于添加4wt%的偶联剂马来酸酐接枝聚乙烯(MAH-g-PE)的WPC的值，表明与MAH-g-PE相比，离子聚合物更能够改善WPC的流动性能，减小熔体流动时HDPE与木粉之间的摩擦阻力；SEM分析表明，添加离子聚合物后HDPE塑料对木粉有很好的包覆效果，没有明显的界面缝隙，且在WPC断面上存在大量的毛刺纤维。

关键词： 木塑复合材料；离子聚合物；毛细管流变；剪切应力；表观黏度

中图分类号： TQ321.5 **文献标志码：** A

Rheological properties of wood flour/HDPE composites modified by ionomer

LI Jingjing[1], SONG Zhanqian[*1], LI Dagang[2], SHANG Shibin[1], GUO Yong[3]

(1. Institute of Chemical Industry of Forestry Products, Chinese Academy of Forestry, Nanjing 210037, China;
2. College of Materials Science and Engineering, Nanjing Forestry University, Nanjing 210037, China;
3. School of Forestry and Landscape Architecture, Anhui Agricultural University, Hefei 230000, China)

Abstract: In order to improve the processing flow performance of wood plastic composites (WPC), the capillary rheological properties of the wood flour/high density polyethylene (HDPE) composites modified by ionomer were studied by using a HAAKE Minilab rheometer. Results show that the wood flour/HDPE melts are all pesudoplastic fluid with or without ionomer, which all show the shear thinning effects. Both the shear stress and apparent viscosity of wood flour/HDPE modified by ionomer show the decline trends with the increasing of sodium ionomer and shear rate, which indicates the addition of sodium ionomer could improve the flowability of HDPE melts obviously. The shear stress and apparent viscosity of wood flour/HDPE adding 4wt% sodium ionomer and 4wt% zinc ionomer are both lower than those of the wood flour/HDPE composites adding 4wt% coupling agent maleic anhydride grafted polyethylene (MAH-g-PE), which demonstrates ionomer could improve the flowability of WPC melt much more compared with MAH-g-PE, and decrease the frictional resistance between HDPE and wood flour as melt flows. SEM analysis shows that HDPE polymer has a good coated effect on wood flour after being added ionomer without clear gap between wood flour and HDPE matrix. In addition, there exists a large number of fibrils on the fracture surface of WPC.

Keywords: wood plastic composites; ionomer; capillary rheology; shear stress; apparent viscosity

收稿日期： 2013-07-18；**录用日期：** 2013-11-12；**网络出版时间：** 2013-11-29 09:49
网络出版地址： www.cnki.net/kcms/detail/11.1801.TB.20131129.0949.003.html
基金项目： 林业公益性行业科研专项(201104004)
通讯作者： 宋湛谦，中国工程院院士，研究方向为林产化学工业。 E-mail：songzq@hotmail.com

引用格式：李晶晶，宋湛谦，李大纲，等. 离子聚合物改性木粉/HDPE复合材料流变特性[J]. 复合材料学报，2014，31(4)：937-943. Li Jingjing, Song Zhanqian, Li Dagang, et al. Rheological properties of wood flour/HDPE composites modified by ionomer [J]. Acta Materiae Compositaes Sinica, 2014, 31(4): 937-943.

木塑复合材料(WPC)是一类涵盖面广、产品种类多、形态结构多样的材料，具有优良的耐水、耐腐蚀性能以及可循环使用等优点。但是在 WPC 生产过程中，由于极性的植物纤维与热塑性非极性的塑料基体之间难以形成良好的界面强度，为了提高纤维和塑料之间的界面结合强度，通常会在体系中添加偶联剂或界面相容剂。为了达到特定的功能，还需同时在 WPC 中添加光稳定剂、阻燃剂和防霉剂等各种助剂，各类添加剂之间的相互作用使得 WPC 所体现的相应性能受到影响，添加量过大还会提高生产成本。因此开发新的材料体系以增强 WPC 的界面强度，同时提高高木粉填充量的 WPC 的抗冲击韧性和流动特性有着重要的意义。

同时具有塑料和橡胶特性的有机离子聚合物被证明可以有效地改进产品的抗冲击韧性[1]。已经商品化的一种乙烯基离子聚合物（商品名 Surlyn)是乙烯-甲基丙烯酸的共聚物[1]。国内外对 WPC 的研究主要集中在界面强度和力学性能等方面[2-4]，而对其流变特性的研究则相对较少。目前对 WPC 流变学的研究主要集中在 2 个方面：(1)体系结构表征。利用旋转流变仪的小振幅振荡流场研究 WPC 熔体的黏弹性与内部结构之间的关系。(2)挤出过程模拟。利用毛细管流变仪的简单剪切流场模拟真实的挤出加工过程，进而研究挤出速度、润滑剂和木粉含量等对 WPC 制品表面质量的影响[5-7]。但是对离子聚合物改性 WPC 的流变性能的研究则相对较少。

本文以高密度聚乙烯(HDPE)为基体材料，木粉作为填充材料，选择 Surlyn 钠离子聚合物和 Surlyn 锌离子聚合物，与传统的偶联剂马来酸酐接枝聚乙烯(MAH－g－PE)进行对比，为离子聚合物改性 WPC 的流变特性提供理论依据。

1　实验材料及方法

1.1　实验原料

采用的实验原料为：木粉，本实验中使用粒径为 180～250 μm 的杨木粉，南京聚峰新材料有限公司，使用前对木粉进行烘干处理，使其含水率低于 3%；HDPE，熔融指数(MFI)为 3 g/10 min(测试温度为 210 ℃，标准实验负荷为 2.16 kg)，密度为 0.94 g/cm^3，固体颗粒状，熔点为 135 ℃，南京聚峰新材料有限公司；钠离子聚合物(DuPont Surlyn 8940)，MFI 为 2.8 g/10 min(测试温度为 190 ℃，标准实验负荷为 2.16 kg)，密度为 0.94 g/cm^3，熔点为 78 ℃，固体颗粒状，美国 DuPont Company；锌离子聚合物(DuPont Surlyn 9120)，MFI 为 1.3 g/10 min(测试温度为 190 ℃，标准实验负荷为 2.16 kg)，密度为 0.97 g/cm^3，熔点为 86 ℃，固体颗粒状，美国 DuPont Company；MAH－g－PE，固体颗粒，接枝率为 0.8%，购自南京德巴化工有限公司。

1.2　毛细管流变测试

将杨木粉、HDPE、MAH－g－PE 和离子聚合物等原料在烘箱中充分干燥，木粉干燥的温度为 103 ℃，干燥时间为 48 h，HDPE、MAH－g－PE 和离子聚合物干燥的温度为 60 ℃，干燥时间为 24 h，然后将干燥好的原料充分混合，用 HAAKE Minilab 微量混合流变仪（HAAKE Minilab Ⅱ，赛默飞世尔上海有限公司）进行共混，温度分别设定为 170、180、190 ℃，手动加料后，进行毛细管流变实验，采用同向锥形双螺杆，转速设定为 10～100 r/min，每次加料时，木粉、HDPE 及添加剂三者总量为 6 g，原料配方如表 1 所示。

表 1　离子聚合物改性木粉/高密度聚乙烯(HDPE)复合材料毛细管流变测试原料配方

Table 1　Sample formulations of wood flour/high density polyethylene (HDPE) composites modified by ionomer for capillary rheological test

No.	Mass ratio/%				
	Wood flour	HDPE	Sodium ionomer	Zinc ionomer	MAH－g－PE
1	40	60	0	0	0
2	40	58	2	0	0
3	40	56	4	0	0
4	40	54	6	0	0
5	40	58	0	0	2
6	40	56	0	0	4
7	40	54	0	0	6
8	40	56	0	4	0
9	30	66	4	0	0
10	50	46	4	0	0

1.3　扫描电子显微镜(SEM)测试

使用 HITACHI S－4800 型场发射扫描电镜(SEM)观察离子聚合物改性的木粉/HDPE 复合材料的表面和液氮脆断后的断面形态。在进行观察之前，样品表面必须进行 30～60 s 的喷金以减少样品在观察过程中的放电，喷金仪器为 SCD 005，电流

设置为 10 mA，实验中的扫描电压为 3 kV。

2 结果及分析

2.1 离子聚合物含量对木粉/HDPE 流变特性的影响

流体在毛细管流变仪中的流动是在压力驱动下的流动，即流体的剪切流动是由沿着毛细管长度方向的压力差产生的。依据 Stwald-Dewaele 幂律公式[8]，共混熔体的剪切黏度 η_a 与剪切速率 γ 的关系式为

$$\eta_a = \sigma/\gamma = m\gamma^{n-1} \quad (1)$$

或 $$\lg \eta_a = \lg m - (1-n)\lg \gamma \quad (2)$$

式中：η_a 为熔体的表观黏度，Pa·s；σ 为剪切应力；γ 为剪切速率，s^{-1}；m 为稠度指数，表示 $\gamma = 1\ s^{-1}$ 时熔体的黏度，是与聚合物温度有关的常数，反映聚合物的黏稠性；n 为幂律指数。

图 1 为木粉含量为 40wt%时，添加不同含量的钠离子聚合物的木粉/HDPE 复合材料的流变特征曲线。可见，添加不同含量的钠离子聚合物的木粉/HDPE 复合材料的 σ 都是随着 γ 的增大而增大，而 η_a 均随 γ 的增大而降低。表明添加与未添加钠离子聚合物的木粉/HDPE 熔体都为非牛顿流体中的假塑性流体，均呈现出“剪切变稀”的效应。η_a 降低可能是因为聚合物在流动时各液层间存在一定的速度梯度，细而长的大分子若同时穿过几个流速不等的液层，同一个大分子的各个部分就要以不同速度前进。因此在流动过程中，每个长链分子总是力图使自己全部进入同一流速的流层。不同流速液层的平行分布就导致了大分子在流动方向上的取向，因而流动过程中分子链构象会发生变化，分子链一面滑动、取向，一面松弛收缩，这两方面都是有阻力的，使得聚合物在流动过程中随剪切速率的增加，黏度降低[9]。此外，在高温下，聚合物熔体分子链间主要存在几何缠结形式，几何缠结可以使聚合物熔体分子链间具有可变的交联空间网状结构(拟网状结构)，当剪切速率增大时，缠结解脱的速率逐渐增加，拟网状结构越来越少，熔体的黏度随剪切速率的增加而下降，这也是表观黏度降低的原因之一[10]。

由图 1 可见，当 γ 低于 100 s^{-1}时，复合材料熔体的假塑性较强，表明此时的 WPC 对剪切效应具有较强的依赖性，剪切特性比较明显，从而可以通过改变剪切速率较快地降低材料的黏度，增加流动性，降低能耗，提高生产效率，从而使材料具有优异的加工性能[11]。还可看出，随着钠离子聚合物含量的增加，WPC 的 σ 和 η_a 均呈现出降低的趋势，表明钠离子聚合物的加入可以增加熔体的流动性，使得 WPC 的加工性能提高，降低能耗。这是因为钠离子聚合物同时起到了偶联剂和润滑剂的效果，可以使得原本不相容的塑料基体和木粉产生界面结合，提高二者的界面相容性，从而减小了熔体流动时 HDPE 与木粉之间的摩擦阻力。

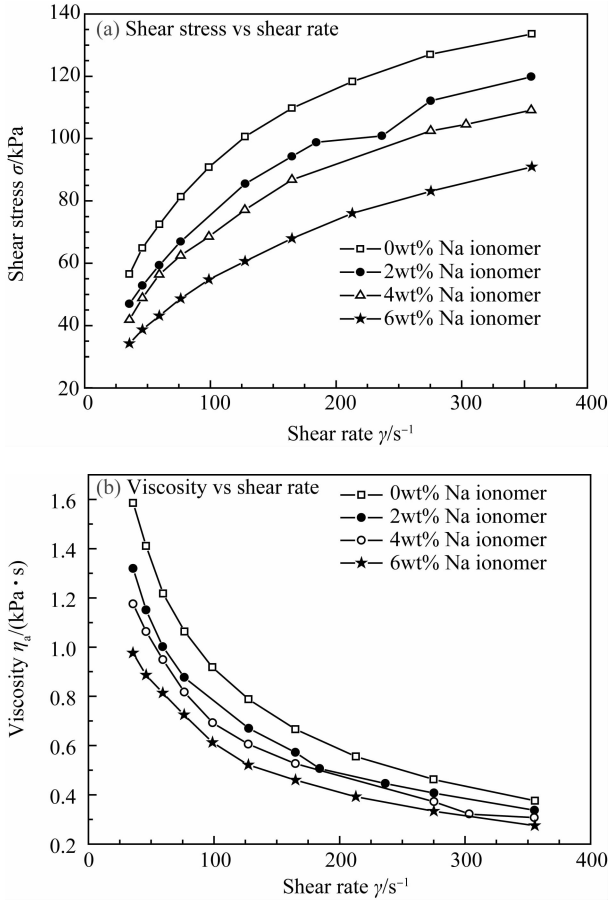


图 1 40wt%木粉含量时添加不同含量的钠离子聚合物的木粉/高密度聚乙烯(HDPE)复合材料流变特征曲线

Fig. 1 Rheological characteristic curves of wood flour/high density polyethylene (HDPE) composites adding Na ionomer with different contents at 40wt% wood flour content

2.2 离子聚合物和 MAH-g-PE 对木粉/HDPE 流变特性的影响对比

图 2 为木粉含量为 40wt%时，添加不同类型助剂的木粉/HDPE 复合材料的流变特征曲线。可以看出，添加 4wt%离子聚合物和 4wt% MAH-g-PE 的木粉/HDPE 熔体的 σ 都是随着 γ 的增加而增加，η_a 随着 γ 的增加而降低，表明添加这 2 种助剂的 WPC 都属于非牛顿流体中的假塑性流体，呈现出典型的“剪切变稀”效应。从图中看出，添加

4wt%的 MAH－g－PE 的复合材料与未添加任何助剂的 WPC 的 σ 和 η_a 区别不大，这是因为：一方面，MAH－g－PE 增强了木粉和 HDPE 的界面结合力，从而提高了 WPC 的黏度；另一方面，MAH－g－PE 包覆在木粉表面，减少了木粉的网络结构，从而降低了 WPC 的黏度；同时，木粉经 MAH－g－PE 酯化后，一定程度上改善了自身的热塑性，从而降低了 WPC 的黏度。增加黏度和降低黏度 2 种作用相互竞争，当降低黏度起主导作用时，WPC 的黏度下降；而当增加黏度起主导地位时，WPC 的黏度增加[9]。而添加 4wt%的钠离子聚合物和 4wt%的锌离子聚合物的 WPC 的 σ 和 η_a 均要低于添加和未添加 MAH－g－PE 的 WPC 的值，表明与 MAH－g－PE 偶联剂相比，离子聚合物更能够提高 WPC 的流动性能，减小熔体流动时 HDPE 和木粉之间的摩擦阻力。由于钠离子聚合物和 HDPE 都具有相似的聚乙烯片段，因此与 HDPE 具有较好的相容性，从而使得 WPC 的熔体的分散性和均相程度提高[12]，降低了熔体的黏度，改善了 WPC 加工性能。

2.3　木粉含量对木粉/HDPE 流变特性影响

图 3 为钠离子聚合物含量为木粉/HDPE/离子聚合物三者总量的 4wt%时，添加不同含量木粉的木粉/HDPE 复合材料的流变特征曲线。可以发现，随着木粉含量的增加，木粉/HDPE 熔体的 σ 和 η_a 都呈现出上升的趋势，50wt%木粉含量的 WPC 的 σ 和 η_a 要远远大于 40wt%和 30wt%木粉含量的 WPC，木粉含量高的 WPC 的 η_a 较高会影响材料熔体的流变行为，这是因为在复合体系中，具有大长径比的纤维容易相互缠结，运动和滑移时纤维间会产生较大的作用力，纤维在体系中阻碍基体材料的流动。在纤维含量较低的情况下，纤维在复合体系中主要受到螺杆和聚合物对其所施加的作用力，纤维之间的作用力较小，从而纤维所受到的剪切应力

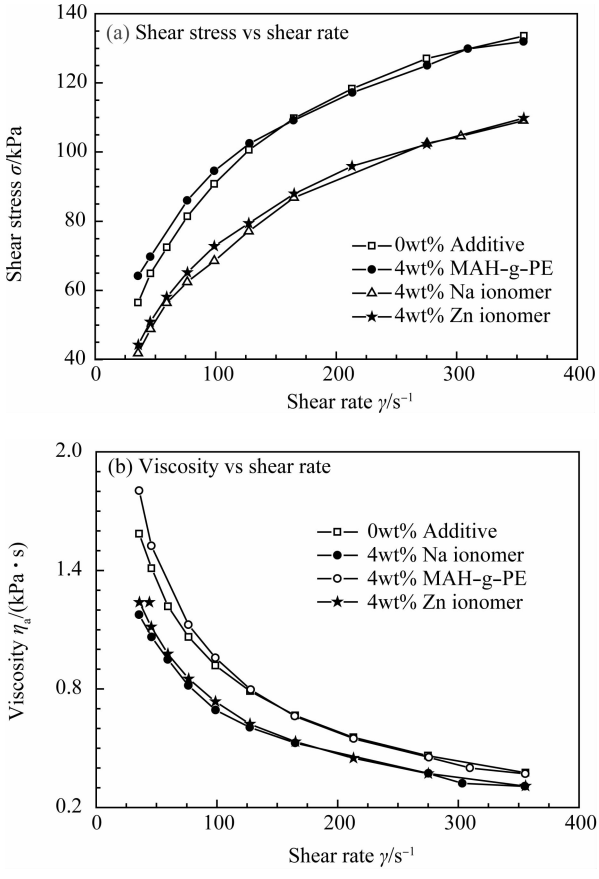


图 2　40wt%木粉含量时添加不同类型助剂的木粉/HDPE 复合材料的流变特征曲线

Fig. 2　Rheological characteristic curves of wood flour/HDPE composites adding different type of additives at 40wt% wood flour content

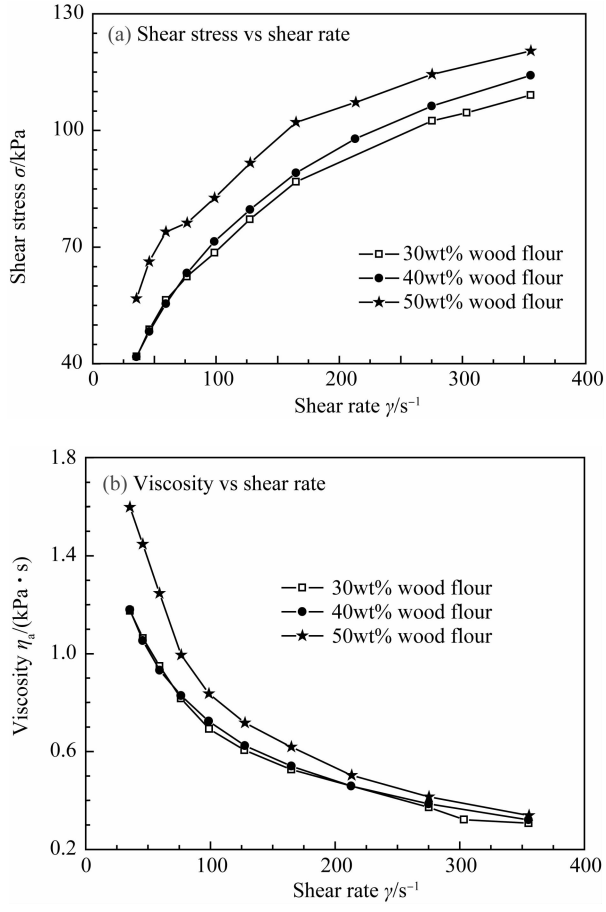


图 3　添加不同含量木粉的木粉/HDPE 复合材料的流变特征曲线

Fig. 3　Rheological characteristic curves of wood flour/HDPE composites adding different contents of wood flour

较小；当纤维含量进一步提高，体系中纤维之间的作用概率增大，纤维之间的作用力增大，而且由于纤维含量的增加，纤维之间基体层的厚度减小，基体聚合物中的实际剪切速率要比表观剪切速率大得多，基体作用在纤维上的剪切应力随之增大，因此，纤维的加入使得 WPC 稠度增大，并随木粉含量的增加而提高，从而导致熔体的黏度提高[13]。

2.4 共混温度对木粉/HDPE 流变特性影响

图 4 为添加 40wt%木粉、4wt%钠离子聚合物时，不同共混温度下木粉/HDPE 复合材料的流变特征曲线。可见，随着 γ 的增加，WPC 的 σ 随温度的增高呈现出降低的趋势，在低剪切速率时，η_a 随温度的增高呈现出降低的趋势，但是当 γ 高于 250 s^{-1}时，η_a 对 γ 的依赖性减弱，且此时 3 种温度下的 η_a 之间的差异变小，表明温度对添加离子聚合物的 WPC 的流变性能有显著的影响。当温度远高于玻璃化转变温度 T_g 和熔点 T_m 时，高分子熔体黏度与温度的依赖关系可用 Arrhenius 方程[10]来描述：

$$\eta = Ae^{E_\eta/RT} \tag{3}$$

式中：η 为温度为 T 时的熔体黏度，Pa·s；A 为与结构有关的常数；E_η 为黏流活化能，kJ/mol；R 为气体常数，J/(mol·K)；T 为温度，K。由式(3)可知，温度升高，熔体黏度下降。在低剪切速率下，由于温度是分子无规则热运动激烈程度的反映，温度升高，分子无规则热运动加剧，分子间距增大，较多的能量使材料内部形成更多“空穴(自由体积)”，因而使链段更易活动，表现为熔体黏度随温度的升高而降低。而在高剪切速率下，熔体黏度对温度已失去敏感性，黏度波动不大，在此剪切速率下加工的 WPC 质量稳定性高[13]。因此在 WPC 的生产过程中，选择合适的温度有重要意义。当加工温度较低时，一方面，物料塑化不好，熔体中会含有未熔解的大球晶；另一方面，低温下物料混炼不充分，木粉分散不均匀，会以团聚体的形式分布在聚合物中，使 WPC 的性能降低；且温度过低时，晶体的成核速率较高，生长速度低，结晶度较低，在一定程度上也会影响 WPC 的性能。而温度过高时，一方面，木粉中的半纤维素和木质素会发生降解，导致 WPC 的力学性能降低；另一方面，聚合物从口模挤出至冷却所需要时间越长，高分子链的松弛转变程度就越大，同样不利于提高力学性能[14]。

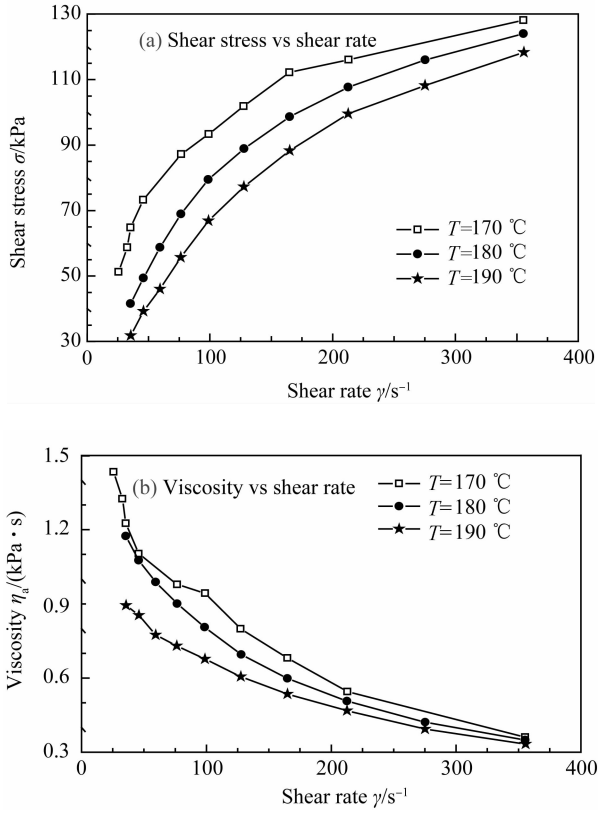
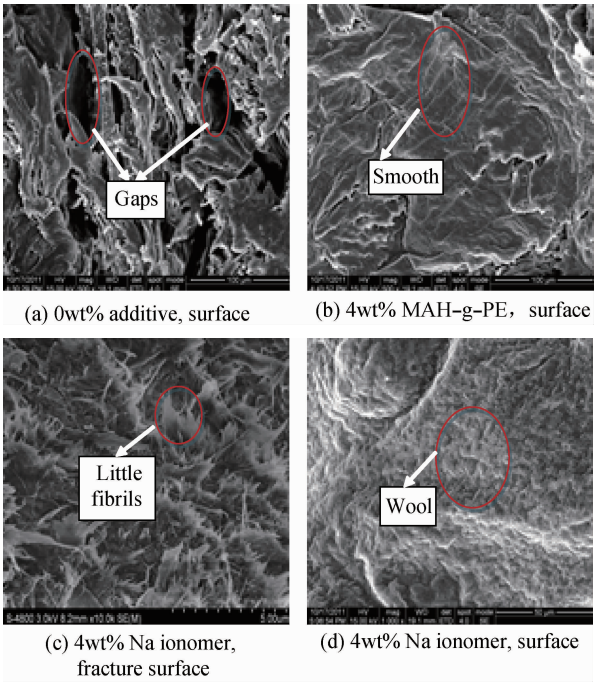


图 4 不同共混温度下木粉/HDPE 复合材料的流变特征曲线

Fig. 4 Rheological characteristic curves of wood flour/HDPE composites at different compounding temperatures

2.5 离子聚合物改性木粉/HDPE 微观形貌

图 5 为添加离子聚合物和 MAH－g－PE 的木



(a) 0wt% additive, surface
(b) 4wt% MAH-g-PE, surface
(c) 4wt% Na ionomer, fracture surface
(d) 4wt% Na ionomer, surface

图 5 添加离子聚合物和 MAH－g－PE 的木粉 HDPE/复合材料的 SEM 图像

Fig. 5 SEM images of wood flour/HDPE composites modified by ionomer and MAH－g－PE

粉/HDPE 复合材料的 SEM 图像。由图 5(a)可见，由于未添加任何助剂，可以观察到有很多空隙和突出的柱形体，这是由于木纤维与聚合物基体的界面结合力较弱，木纤维与聚合物基体之间存在较大的空隙，材料受到外在拉力载荷时木纤维被拔出，表明木纤维与聚合物之间的界面相容性较差，在受到外力载荷时，不能及时地实现木纤维与 HDPE 之间的应力传递，造成应力集中，材料容易断裂；而且木质纤维与 HDPE 不能很好结合，纤维在塑料熔体中也会造成较大的摩擦和阻碍效果，从而使复合材料的熔体具有较高的黏度。由图 5(b)可见，40wt%木粉中添加 4wt% MAH－g－PE 后试样的表面形貌与图 5(a)相比，纤维与 HDPE 之间的缝隙已经大量减少，二者出现了良好的界面结合，具有相对平滑的表面。由图 5(c)添加钠离子聚合物的 WPC 的液氮脆断断面形貌可以发现，材料的断面都是细小的纤维毛刺，有大量的“冷拔”现象[15]，与传统的 WPC 的脆性断裂光洁的断面形态不同，表明离子聚合物可以改进 WPC 的抗冲击韧性。由图 5(d)发现，添加一定含量的钠离子聚合物后，木粉颗粒在塑料基体中分散均匀，塑料对木粉具有较好的包覆效果，表面浑然一体，看不出明显的空隙和界面。表明离子聚合物起到了界面相容剂的作用，当 WPC 受到外部施加的载荷时，HDPE 可以迅速向木粉传递应力，从而提高了木粉和塑料之间的界面强度，同时木粉对塑料熔体的摩擦阻碍作用降低，改善了 WPC 的加工流动性能。

3　结　论

(1) 流变性能分析表明，添加不同含量的钠离子聚合物的木粉/高密度聚乙烯(HDPE)熔体的表观黏度均随剪切速率的增大而降低；添加与未添加钠离子聚合物的木粉/HDPE 均为假塑性流体，均呈现出“剪切变稀”效应。

(2) 随着钠离子聚合物含量的增加，改性木粉/HDPE 的剪切应力和表观黏度都呈现出降低的趋势，表明钠离子聚合物的加入可以增加熔体的流动性，使改性木粉/HDPE 的加工性能提高，降低能耗。

(3) 添加 4wt%钠离子聚合物和 4wt%锌离子聚合物的改性木粉/HDPE 的剪切应力和表观黏度均要低于添加 4wt% 马来酸酐接枝聚乙烯(MAH－g－PE)的改性木粉/HDPE 的值，表明与 MAH－g－PE偶联剂相比，离子聚合物更能够提高 WPC 的流动性能，减小熔体流动时 HDPE 与木粉之间的摩擦阻力。

(4) SEM 分析表明，添加离子聚合物的改性木粉/HDPE 的断面上有大量的纤维毛刺，添加离子聚合物可以提高材料的抗冲击韧性；且添加离子聚合物后 HDPE 对木粉有很好的包覆效果，没有明显的界面缝隙。

参考文献：

[1] 曲桂杰，刘景江. 离子聚合物在 Nylon-1010/PP 共混物中的增容作用 [J]. 应用化学，1995，13(4)：71-74.
Qu Guijie，Liu Jingjiang. Effect of ionomer on the miscibility of nylon-1010/PP blends [J]. Applied Chemistry，1995，13(4)：71-74.

[2] 关苏军，万春风，汪丽娜，等. 玄武岩纤维增强木塑复合材料的力学性能 [J]. 复合材料学报，2011，28(5)：162-167.
Guan Sujun，Wan Chunfeng，Wang Lina，et al. Mechanical properties of basalt fiber reinforced wood-plastic composites [J]. Acta Materiae Compositae Sinica，2011，28(5)：162-167.

[3] 赵永生，王克俭，朱复华，等. 蒙脱土/硅烷改性木粉/PVC 复合材料 [J]. 复合材料学报，2007，24(3)：63-71.
Zhao Yongsheng，Wang Kejian，Zhu Fuhua，et al. Properties of montnorillonite/silane-modified wood floor/PVC composites [J]. Acta Materiae Compositae Sinica，2007，24(3)：63-71.

[4] 程　羽，郭　成，景成芳，等. 木塑复合材料疲劳性能的研究 [J]. 复合材料学报，2001，18(4)：119-122.
Cheng Yu，Guo Cheng，Jing Chengfang，et al. Fatigue properties of wood plastic composites [J]. Acta Materiae Compositae Sinica，2001，18(4)：119-122.

[5] 王　鹏. 高填充木塑复合材料流变行为与结晶性质研究 [D]. 上海：上海交通大学，2011：14.
Wang Peng. Study on rheological behaviors and crystallization properties of highly filled wood plastic composites [D]. Shanghai：Shanghai Jiao Tong University，2011：14.

[6] 杨文斌，章耀林，陈恩惠，等. 竹粉/高密度聚乙烯复合材料动态流变特性 [J]. 农业工程学报，2012，28(7)：288-292.
Yang Wenbin，Zhang Yaolin，Chen Enhui，et al. Dynamic rheological properties of bamboo flour/high density polyethylene (HDPE) composite [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering，2012，28(7)：288-292.

[7] Ghasemi I，Azizi H，Naeimian N. Rheological behaviour of polypropylene/kenaf fibre/wood flour hybrid composite [J]. Iranian Polymer Journal，2008，17(3)：191-198.

[8] Klyosov A A. Wood plastic composites [M]. Hoboken，New Jersey：John Wiley & Sons Inc.，2007：620-622.

[9] Li J. The effect of surface modification with nitrc acid on the mechanical and tribological properties of carbon fiber reinforced thermoplastic polyimide composite [J]. Surface and Interface Analysis, 2009, 41(9): 759-763.

[10] Joseph P V, Oommen Z, Joseph K, et al. Melt rheological behaviour of short sisal fibre reinforced polypropylene composites [J]. Journal of Thermoplastic Composite Materials, 2002, 15(2): 89-114.

[11] Li T Q, Wolcott M P. Rheology of wood plastics melts. Part 3: nonlinear nature of the flow [J]. Polymer Engineering & Science, 2006, 46(1): 114-121.

[12] Zhang Y C, Xie J F, Wu H Y, et al. Crystallization and mechanical properties of nano ZnO/PP/PLA composite filaments [J]. Materials Processing and Design, 2009, 620-622: 485-488.

[13] 曾广胜，许　超，刘跃军. 废纸浆/HDPE复合发泡材料的流变行为及发泡形态 [J]. 化工学报，2011，62(9)：2643-2650.
Zeng Guangsheng, Xu Chao, Liu Yuejun. Rheological behavior and cell morphology of foamed waste paper pulp/HDPE composites [J]. CIESC Journal, 2011, 62(9): 2643-2650.

[14] 刘跃军，刘亦武，魏珊珊. EVOH/纳米 SiO_2 复合材料的加工流变性能及应用 [J]. 高分子材料科学与工程，2011，27(5)：124-127.
Liu Yuejun, Liu Yiwu, Wei Shanshan. Processing rheological property and application of EVOH/SiO_2 nanocomposites [J]. Polymer Materials Science and Engineering, 2011, 27(5): 124-127.

[15] Li T Q, Wolcott M P. Rheology of wood plastics melt. Part 1. Capillary rheometry of HDPE filled with maple [J]. Polymer Engineering & Science, 2005, 45(4): 549-559.