

P(MAA-co-BA)对 PVC-木粉复合材料性能的影响

朱德钦 生瑜 刘希荣

(福建省高分子材料重点实验室, 福建师范大学化学与材料学院)

摘要:为改善亲油性的 PVC 基体与亲水性木粉之间的相容性, 用甲基丙烯酸与丙烯酸丁酯共聚物 (P(MAA-co-BA)) 作为 PVC-木粉复合材料的相容剂, 研究相容剂的用量及木粉的碱预处理对 PVC-木粉复合体系性能的影响, 并通过 FTIR、接触角、DSC、SEM 等手段来表征。FTIR 表明: 改性后木粉与 P(MAA-co-BA) 发生了化学键合。接触角分析表明: 改性后木粉与 PVC 界面张力下降; P(MAA-co-BA) 有利于木粉与 PVC 界面的改善和相容性的提高, 适量的 P(MAA-co-BA) 可以提高复合材料的力学性能, 过量反而降低力学性能; 当 P(MAA-co-BA) 用量为木粉用量的 10% 时, 复合材料的拉伸强度提高了 70.9%, 冲击强度提高了 64.7%; 木粉经碱预处理后再用相容剂处理能进一步提高 PVC-木粉复合材料的力学性能。DSC 表明: 改性后木粉与 PVC 相容性提高。SEM 表明: 木粉改性后, 既改善了在 PVC 基体中的分散性, 又提高了两者的相容性。

关键词: 木粉; 聚氯乙烯; 复合材料; 相容剂; 力学性能

中图分类号: TQ32 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-1522(2010)01-0097-06

ZHU De-qin; SHENG Yu; LIU Xi-rong Effects of P(MAA-co-BA) on the properties of PVC-wood flour composite Journal of Beijing Forestry University (2010) 32(1) 97-102 [Ch, 22 ref] Fujian Key Laboratory of Polymer Materials College of Chemistry and Materials Science Fujian Normal University, Fuzhou 350007, P. R. China

In order to improve the compatibility between lipophilic PVC matrix and hydrophilic wood flour (WF), the copolymer P(MAA-co-BA) of methyl acrylate and butyl acrylate was introduced into PVC-WF composite as compatibilizer. The effects of content of P(MAA-co-BA) and NaOH pretreatment to WF on the mechanical properties of the composite were studied and analyzed by means of FTIR, contact angle, DSC and SEM. The results showed that the interface compatibility of PVC and WF was benefited from P(MAA-co-BA), so the mechanical properties of composite were improved, but excessive P(MAA-co-BA) would reduce the mechanical properties. The tensile strength and impact strength of composite were enhanced by 70.9% and 64.7% respectively, when the content of P(MAA-co-BA) was 10% of wood flour. The mechanical properties of PVC-WF composite could be further enhanced by double treatment of NaOH and P(MAA-co-BA). FTIR spectra confirmed that the modified WF and P(MAA-co-BA) formed a chemical bond, and the contact angle analysis showed that the interfacial tension between modified WF and PVC declined. DSC confirmed that the compatibility of WF and PVC was improved after modification. SEM results also showed that the modification not only improved the dispersion of WF in PVC matrix, but improved the compatibility between WF and PVC.

Key words: wood flour; poly(vinyl chloride); composite; compatibilizer; mechanical properties

收稿日期: 2008-12-25

基金项目: 福建省科技厅重点项目 (2008Y0036)、福建省教育厅项目 (JB06075、JA09053)、福建省首届大学生创新性实验计划项目 (Fjnu2007-012)。

第一作者: 朱德钦, 副教授。主要研究方向: 聚合物基复合材料、林产化学加工工程。电话: 0591-83525029 Email: zhudeqin@fjnu.edu.cn 地址: 350007 福州福建师范大学化学与材料学院。

责任作者: 生瑜, 博士, 研究员。主要研究方向: 高分子功能化改性、植物材料化学与利用。电话: 13107633538 Email: shengyu@fjnu.edu.cn 地址: 同上。

本刊网址: <http://www.bjfujournal.cn>; <http://journal.bjfu.edu.cn>

聚氯乙烯 (PVC)木塑复合材料是一种优良的新型材料,具有植物纤维和高分子材料两者的诸多优点,能替代木材,在建材、汽车、包装运输等方面有着广泛应用,可有效地缓解我国森林资源匮乏、木材供应紧缺的矛盾。由于天然植物纤维的可再生性、可被环境消纳性,所以 PVC木塑复合材料也是一种极具发展前途的绿色环保材料,其生产技术亦被认为是一项有生命力的创新技术,具有广阔的市场前景和良好的经济、社会效益,已成为目前材料领域的研究热点之一^[1-2]。

由于木粉的主要成分纤维素、半纤维素、木质素等含有大量的亲水性基团,所以木粉具有较大的吸水性,这导致其与 PVC基体的相容性较差,界面黏合强度低,在基体中难以均匀分散,从而影响复合材料的力学性能。解决这一问题的途径之一是对木粉进行处理,增加其与基体树脂的相容性。目前,有用热^[3]、放电^[4](如低温等离子处理和电晕处理)、蒸汽爆破^[5]、碱^[6]、酯化^[7-8]、纤维表面接枝共聚^[9]等方法处理,但工艺相对复杂且成本较高,在实际生产中应用不多;另一种较简便的方法是通过添加硅烷偶联剂^[10]、聚异氰酸酯类偶联剂^[11]、马来酸酐接枝聚合物^[12]等相容剂。这些方法虽能在一定程度上提高植物纤维与塑料基体的相容性,促进木粉的分散,但对加工性能改善不明显,往往需要添加润滑剂来改善 PVC木塑复合材料的加工流动性能。Sombatsam pop等^[13]在研究丙烯酸脂类加工助剂对 PVC木塑复合材料的影响时发现,虽然甲基丙烯酸甲酯与丙烯酸丁酯共聚物和甲基丙烯酸甲酯与丙烯酸乙酯共聚物未能提高复合材料的机械性能,却很好地提高了其热性能、尺寸稳定性以及加工流动性。鉴此,本研究用本课题组的专利方法^[14]合成一种新型相容剂甲基丙烯酸与丙烯酸丁酯共聚物 (P(MAA-co-BA))用于 PVC木塑复合材料的制备。该相容剂除具有与 PVC良好相容的丙烯酸脂类基团外,又因引入了可与木粉表面羟基形成化学键合的丙烯酸,预计其在提高复合材料加工性能及热性能的同时,还有利于力学性能的提高。

1 材料与方 法

1.1 原料与试剂

PVC SG-3型,宁夏金昱元化工集团有限公司;杉木 (*Cunninghamia lanceolata*)粉,粒径 ≤ 0.850 mm,福建福安;邻苯二甲酸二辛酯、复合热稳定剂、液体石蜡为市售工业品;丙酮,分析纯,上海实验试剂有限公司;甲基丙烯酸与丙烯酸丁酯共聚物 (P(MAA-co-BA)),自制,特性黏度为 49.60 mL/g

羧值为 4.35 mmol/g

1.2 PVC木粉复合材料的制备

原料木粉(简称为 WF1)先用 15%的 NaOH 溶液浸泡 5 h后,用清水洗净并干燥,得到 NaOH 处理的木粉(简称为 WF3)。将 P(MAA-co-BA)与干燥的木粉 WF1和 WF3分别在 SHR-25A型高速混合机 110℃下混合 15 min得到 WF2和 WF4。将 4种木粉分别与 PVC及各种助剂在高速混合机中混合后,在辊温为 170℃的 SK-160B型开炼机上塑化,经 YX(O)-45型热压成型机在 180℃、13 MPa模压制得 PVC木粉复合材料,最后在 CPJ-25型冲片机上制得测试样条。

1.3 性能测试与分析

1)用承德试验机厂 LJ-5000N型拉力试验机按 GB/T 1040-2006^[15]测定 PVC木粉复合材料的拉伸强度,拉伸速度为 10 mm/min。

2)用承德试验机厂 X CJ-40型冲击试验机按 GB/T 1043-1993^[16]测定 PVC木粉复合材料的冲击强度。

3)用美国 Nicolet公司 Avatar 360型红外光谱仪采用 KBr压片法测定处理及未处理木粉的红外光谱,测试前各种木粉均经过丙酮索氏提取 24 h。

4)用承德试验机厂 JY-82型接触角测定仪测定木粉与各种试剂的接触角。

5)用德国 Netzsch PC 200型示差扫描量热分析仪进行 DSC 测试,气氛为氮气,升温速率为 10 K/min,升温范围为室温 ~ 220℃。

6)用中科院仪器厂 KYKY-1000B型扫描电子显微镜 (SEM)观察经喷金处理的复合材料的冲击断面。

2 结果与讨论

2.1 红外光谱分析

图 1为木粉改性前后的红外光谱,样品测试前用丙酮索氏提取以去除未能与木粉产生化学结合的相容剂。从图 1可以看出:WF1在 3 415 cm^{-1} 左右有 1个宽而强的吸收峰,这主要是由木粉中含有的羟基多聚体的伸缩振动而产生,2 919 cm^{-1} 左右为木粉的甲基、亚甲基中 C-H 的伸缩振动峰,1 739 cm^{-1} 处的肩峰为半纤维素上 C=O 的伸缩振动^[17],1 383 cm^{-1} 为木粉中脂肪族甲基上的 C-H 变形振动吸收峰,1 161 cm^{-1} 为木粉中吡喃环上 C-O-C 的伸缩振动,892 cm^{-1} 左右为木粉中 β -葡萄糖甙键的吸收峰^[18-19]。对比 WF1与 WF3 木粉经碱处理后,其在 1 739 cm^{-1} 处的肩峰消失,说明经

NaOH 浸泡以后,木粉中的半纤维素、木质素等有一定程度的溶解。对比 WF1 与 WF2 经过 P(MAA⁻co-BA)改性的 WF2 除在 3 415、2 919、1 383、892 cm⁻¹等处仍存在较强的木粉特征吸收峰外,与 WF1 中 1 739 cm⁻¹附近的肩峰明显不同的是,该处出现了 1 个较强的特征吸收峰。显然,该峰强度的提高可归因于来自 P(MAA⁻co-BA)中的 C=O 伸缩振动吸收峰与半纤维素上 C=O 的伸缩振动吸收峰重叠所致。而且对比 WF3 与 WF4 发现,原来因碱洗而在 WF3 中消失的 1 731 cm⁻¹附近的 C=O 伸缩振动吸收峰在 WF4 中又重新出现。很明显,这一 C=O 伸缩振动吸收峰强度的变化也来自于 P(MAA⁻co-BA)上的 C=O。由于 P(MAA⁻co-BA)经受住丙酮提取而不被洗脱,说明 P(MAA⁻co-BA)与木粉表面形成某种化学键合或氢键作用,这有利于 PVC-木粉复合材料力学性能的提高。

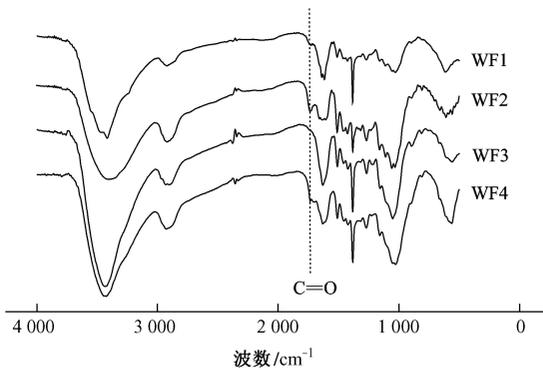


图 1 不同木粉的 FTIR 谱图

Fig 1 FTIR spectra of different wood flour

2.2 接触角分析

通过测定 WF1、WF2、WF3、WF4 与蒸馏水、乙二醇、苯胺、液体石蜡等不同极性液体的接触角,比较各种液体的润湿情况,可了解改性前后木粉表面性质的变化。从表 1 可以看出:与 WF1 相比,WF2 和 WF4 与非极性液体(液体石蜡)的接触角略有下降,说明表面改性对非极性液体在木粉表面的浸润性影响不大;相比之下,表面处理后与水、乙二醇、苯胺等极性液体的接触角显著增大,说明木粉表面已由亲水转为疏水,极性得到降低。而碱洗木粉 WF3 和 WF4 的接触角均比相对应的未碱洗的小,这可能一方面是因为木粉经过碱处理,洗去了果胶、木质素等碱可溶物,表面会出现更多的孔洞^[6],导致样品表面粗糙度增加,液体在毛细管作用下迅速下渗,使得测量值偏小;另一方面木粉经过碱处理后暴露出更多富含极性的纤维素的表面。

通过接触角的数据,可以进一步计算出木粉的

表 1 木粉处理前后的接触角

编号	蒸馏水	乙二醇	苯胺	液体石蜡
WF1	56.3	15.2	20.3	15.3
WF2	95.5	49.7	31.7	13.3
WF3	38.3	11.3	17.5	10.3
WF4	56.7	45.3	40.5	12.8

表面自由能,研究其表面性质。根据文献 [20]有:

$$\gamma_l(1 + \cos\theta) \approx 2[(\gamma_s^d \gamma_l^d)^{1/2} + (\gamma_s^p \gamma_l^p)^{1/2}] \quad (1)$$

式中: γ_l 为液体表面张力, θ 为接触角, γ_s^d 、 γ_s^p 则分别为固体表面自由能的色散分量和极性分量, γ_l^d 、 γ_l^p 分别表示液体表面张力的色散分量和极性分量。据表 1 所测接触角和从文献 [20] 查到其相应的 γ_l 、 γ_l^d 、 γ_l^p 数据,以 $\gamma_l(1 + \cos\theta) / 2$ 对 $(\gamma_l^d / \gamma_l^p)^{1/2}$ 作图,求出直线的截距 $(\gamma_s^p)^{1/2}$ 和斜率 $(\gamma_s^d)^{1/2}$, 进一步可算出 γ_s^d 、 γ_s^p , 即可求得各种木粉的表面自由能 γ_s (见表 2)。从表 2 可以看出:WF3 较 WF1 表面自由能略有提高;WF2 较未改性 WF1 的表面自由能下降了 19.3%, 尤其是极性分量 γ_s^p 大幅度下降;另外 WF4 较未改性 WF3 的表面自由能下降更明显,下降了 22.4%。证实木粉经过 P(MAA⁻co-BA) 处理后,表面极性均降低。

表 2 木粉处理前后的表面自由能

编号	γ_s^d	γ_s^p	γ_s
WF1	27.5	18.5	46.0
WF2	35.8	1.3	37.1
WF3	23.9	29.3	53.2
WF4	22.9	18.4	41.3

为进一步研究改性木粉与 PVC 的相容性以及它们相界面的黏结力大小,分别通过式 (2)^[21]、(3) 来计算木粉与 PVC 基体的界面张力 γ_{12} 和相界面的黏结功 W_{12} , 结果见表 3。

$$\gamma_{12} = [(\gamma_1^d)^{1/2} - (\gamma_2^d)^{1/2}]^2 + [(\gamma_1^p)^{1/2} - (\gamma_2^p)^{1/2}]^2 \quad (2)$$

$$W_{12} = 2(\gamma_1^d \gamma_2^d)^{1/2} + 2(\gamma_1^p \gamma_2^p)^{1/2} \quad (3)$$

式中: γ_{12} 、 W_{12} 为两种相互接触材料 1、2 之间的界面张力和相界面黏结功, γ^d 、 γ^p 分别为材料表面自由能的色散分量和极性分量。

从表 3 可以看出:与 WF1 相比,WF3 与 PVC 的界面张力明显上升;但 WF2、WF4 与 PVC 之间的界面张力分别比相应的 WF1、WF3 与 PVC 之间的界面张力显著下降,其中以 WF2 与 PVC 的界面张力下降最为显著。这再次表明改性后木粉与 PVC 的相容性得到提高,说明改性木粉在基体树脂 PVC 中的分散性得到提高,这有利于木塑复合材料力学性能的提高。

表 3 处理前后木粉与 PVC 的界面张力和黏附功
Tab 3 Interfacial tension and work of adhesion $\text{mJ} \cdot \text{m}^{-2}$
between PVC and different WF

编号	γ_{12}^d	γ_{12}^h	γ_{12}	W_{12}
PVC-WF1	1.2	9.5	10.7	76.9
PVC-WF2	0.1	0.008	0.1	78.5
PVC-WF3	2.1	17.6	19.7	75.1
PVC-WF4	2.4	9.4	11.8	71.0

黏附功是为了使互相接触的两相物质分离而形成新表面所作的功,是表征润湿在固体表面的液体在固体表面黏附牢固程度的量。黏附功越大,说明两相结合越牢固,复合材料抗拉强度也大。从表 3 可以看出:WF2 与 PVC 的黏附功最大。这说明木粉经 P(MAA⁻co-BA)处理后与 PVC 之间的两相结合牢固,复合材料强度将增大;同时由于其间的界面张力很小,说明改性后木粉在 PVC 基体中的分散性能很好,有利于提高两相间总的接触面积,最终所得复合材料的强度增大。WF4 与 PVC 的黏附功仅为 71.0 mJ/m^2 ,但其与 PVC 形成的复合材料的力学性能最好。这主要是因为黏附功并不是影响复合材料

强度的唯一因素,还必须同时考虑到表面自由能及其分量、界面张力、填充料的形态等因素的影响才能得出较为合理的结论。木粉经过碱处理,洗去了果胶、木质素等碱可溶物,表面会出现更多的孔洞^[6],导致样品表面粗糙度增加,再经 P(MAA⁻co-BA)改性后分散性得到提高,从而增加了木粉与 PVC 基体的机械咬合力,所以复合材料表现出更好的力学性能。

另外,将改性前后的木粉分别投入水中,可观察到未改性的木粉很快分散在水中,而改性后的却漂浮在水面上,这也从侧面上说明了木粉表面接枝上了 P(MAA⁻co-BA)后,木粉的表面性质发生了改变。

2.3 复合材料的力学性能分析

图 2 是 P(MAA⁻co-BA)用量对 PVC-木粉复合材料拉伸强度、断裂伸长率和冲击强度的影响。从图 2a 可以看出:未添加相容剂 P(MAA⁻co-BA)时,复合材料的拉伸强度较低;随着 P(MAA⁻co-BA)添加,复合材料的拉伸强度出现先提高后降低的变化规律;当 P(MAA⁻co-BA)用量为木粉用量的 10% 时,拉伸强度达到 31.08 MPa 提高了 70.6%。

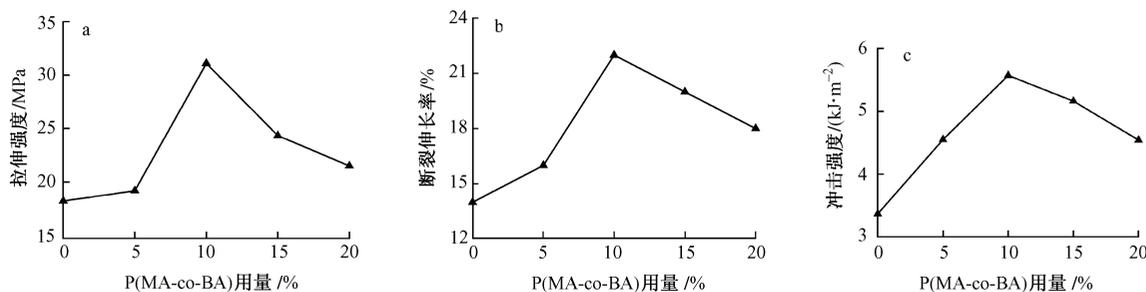


图 2 P(MAA⁻co-BA)用量对复合材料力学性能的影响

Fig 2 Effects of P(MAA⁻co-BA) content on mechanical properties of composites

注: $m(\text{PVC}) : m(\text{WF4}) = 100 : 20$ 。

从图 2b 可以看出:与拉伸强度一样,随着 P(MAA⁻co-BA)的添加,复合材料的断裂伸长率由 14% 上升到 22%;当添加量超过 10% 后,断裂伸长率虽有所下降,但仍大于未添加体系的值。

从图 2c 可以看出:与拉伸强度和断裂伸长率相似,冲击强度也在添加量为 10% 的时候达到最大值;随着添加量的继续增大,复合材料的冲击强度下降。

可见,复合材料的力学性能与 P(MAA⁻co-BA)用量有密切关系。究其原因: P(MAA⁻co-BA)中的一 COOH 可与木粉上的一 OH 反应而牢固地结合在木粉表面,故随着 P(MAA⁻co-BA)用量的增多,木纤维中越多的一 OH 被反应,改变了木粉表面因具有多羟基而极性过大的性质;另外 P(MAA⁻co-BA)分子中的 PBA 链段与 PVC 的相容

性极好,因此随着 P(MAA⁻co-BA)用量的增多,复合材料的力学性能逐渐提高。当 P(MAA⁻co-BA)用量过多时,木粉表面会覆盖过量的 P(MAA⁻co-BA)分子,由于 P(MAA⁻co-BA)的相对分子量较小(特性黏度为 49.60 mL/g),多余的 P(MAA⁻co-BA)形成的弱界面层将导致复合材料力学性能的下降;另外, P(MAA⁻co-BA)中酯基链段对 PVC 具有较好的增塑作用,减小了 PVC 分子链之间的作用力,从而使复合材料强度降低。

从图 2 可以看出:木粉经过 15% 的 NaOH 预处理后,再用 P(MAA⁻co-BA)处理的复合材料的各项力学性能均进一步提高。木粉经 NaOH 溶液浸泡后,其中的果胶、木质素、半纤维素等被洗脱,使得纤维素束变得蓬松,并增加了木粉的表面粗糙度^[6],提高了与 PVC 基体的有效接触面积和界面嵌接,也

使 $P(\text{MAA-co-BA})$ 更容易与之结合, 因此碱预处理木粉可以提高复合材料的性能。

2.4 复合材料的 DSC 分析

从图 3 中可以看出, 3 种木塑复合材料均在 $30\sim 50^\circ\text{C}$ 之间分别出现 1 个较大的吸热峰, 这是复合材料中木粉的物理吸附水解吸所致^[22]。PVC-WF1、PVC-WF2 和 PVC-WF4 的解吸温度分别为 47.2 、 39.2 和 31.6°C , 这表明木粉经过处理以后更容易解吸吸附水。因为经过处理以后, 木粉的性质从亲水性向疏水性转变, 与水的结合能力下降, 所以在较低的温度下就开始解吸吸附水。这也从侧面证明了木粉经过处理以后表面性质发生了改变。PVC-WF1、PVC-WF2 和 PVC-WF4 中 PVC 基体的玻璃化转变温度分别为 76.2 、 75.1 和 74.3°C 。经

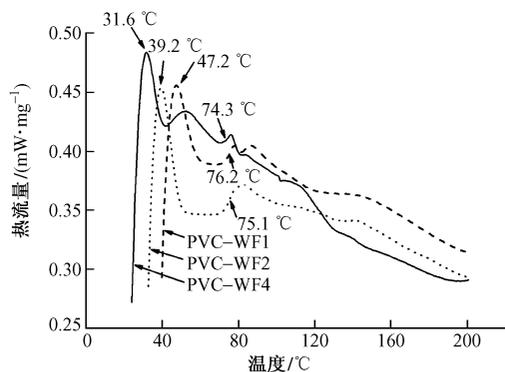


图 3 不同复合材料的 DSC 曲线

Fig 3 DSC analyses of different composites

过处理以后复合材料的玻璃化转变温度降低, 这是因为: PVC 分子中的氯原子可与木粉表面的羟基形成氢键作用, 使得 PVC 分子链刚性变强; 而木粉用相容剂 $P(\text{MAA-co-BA})$ 处理后, PMAA 链段中的羧基与木粉表面羟基发生反应, 且 PBA 链段与 PVC 基体相容, 从而隔绝了氯原子与木粉表面羟基的作用, 使得 PVC 分子链的运动能力变强, 刚性下降; 而经过双重处理以后, $P(\text{MAA-co-BA})$ 更容易与木粉反应, 因此复合材料的玻璃化转变温度进一步降低, 木粉与 PVC 基体的相容性提高。

2.5 复合材料的 SEM 分析

从图 4a 可见: PVC-WF1 复合材料中, 木粉不能很好的分散, 存在着木粉局部过分集中的现象, 复合材料两相界面明显且有空洞存在。这说明木粉与基体树脂间黏接较弱, 在断裂过程中, 木粉很容易从基体树脂中拔出, 复合材料的机械性能差。然而木粉经过 10% $P(\text{MAA-co-BA})$ 处理 (见图 4b) 的复合材料, 木粉在 PVC 基体中分散得比较均匀, 无局部过分集中现象, 而且木粉粒子断裂, PVC 基体发生拉丝现象, 复合材料的界面空隙也比较小。从图 4c 可见: 木粉经过碱与 $P(\text{MAA-co-BA})$ 双重处理以后, 木粉粒子与基体树脂的界面变得更加模糊, 空隙很少。这说明相容剂的存在, 一方面增加了木粉与基体树脂的相容性, 另一方面使木粉在基体中有良好分散: 碱预处理能够增强木粉与基体树脂的界面黏接。因此在宏观上表现为复合材料力学性能的提高。

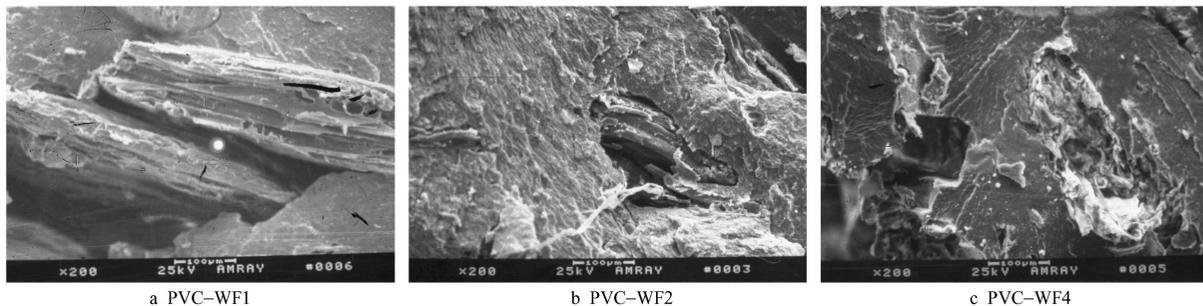


图 4 不同复合材料的 SEM 图片

Fig 4 SEM photos of different composites

3 结 论

FTR 结果证实 $P(\text{MAA-co-BA})$ 可与木粉或碱处理木粉发生化学键合; 接触角分析表明木粉经 $P(\text{MAA-co-BA})$ 处理后表面极性降低, 与 PVC 基体的界面张力显著下降, 所以 $P(\text{MAA-co-BA})$ 可以在 PVC 木粉复合材料中起到相容剂的作用, 改善复合材料的力学性能。随着 $P(\text{MAA-co-BA})$ 用量

的增加, 复合材料的力学性能出现先提高后降低的变化规律。当 $P(\text{MAA-co-BA})$ 用量为木粉用量的 10% 时, 复合材料的拉伸强度、断裂伸长率和冲击强度均达到最大值。采用 NaOH 预处理木粉后再用 $P(\text{MAA-co-BA})$ 处理, 复合材料的力学性能进一步提高。DSC 结果进一步证明, 木粉经 $P(\text{MAA-co-BA})$ 处理, 与 PVC 基体相容性提高。SEM 观察结果显示, 木粉在 PVC 基体中的分散性和相容性提高。

参 考 文 献

- [1] LU J Z WU Q HAROLD S Chemical coupling in wood fiber and polymer composites: A review of coupling agents and treatments[J]. *Wood Sci Technol* 2000, 32(1): 88-104.
- [2] JIANG H H KAMEDM D P Development of Poly(vinyl chloride)/wood composites: A literature review[J]. *J Vinyl Addit Technol* 2004, 10(2): 59-69.
- [3] THUVANDER F IFETEW G K BERGLUND L A Modeling cell wall drying stress in wood[J]. *Wood Sci Technol* 2002, 36(2): 241-254.
- [4] GEORGE J SREEKALA M S THOMAS S A review on interface modification and characterization of natural fiber reinforced plastic composites[J]. *Polym Eng Sci* 2001, 41: 1471-1485.
- [5] KESSLER R W BECKER U OHLER R K Steam explosion of flax—a superior technique for upgrading fiber value[J]. *Biomass and Bioenergy* 1998, 4(3): 237-249.
- [6] CARMEN A MIREN I Effects of filler treatments on the mechanical and morphological behavior of PP+wood flour and PP+sisal fiber[J]. *Mater Res Innov* 2001, 4: 284-293.
- [7] ZAFEROPOULOS N E BAILLIE C A HODGKINSON J M Engineering and characterization of the interface in flax fiber/polypropylene composite materials(II): The effect of surface treatments on the interface[J]. *Compos Part A* 2002, 33: 1185-1190.
- [8] PASQUINI D TEKERA E M CURVELO A A S et al Surface esterification of cellulose fibres: Processing and characterisation of low-density polyethylene/cellulose fibres composites[J]. *Compos Sci Technol* 2008, 68(1): 193-201.
- [9] CANCHE-ESCAMILLA G RODRIGUEZ-LAVIADA J CAUICH-CUPUL J I et al Flexural impact and compressive properties of a rigid-thermoplastic matrix/cellulose fiber reinforced composites[J]. *Compos Part A* 2002, 33: 539-549.
- [10] SOMBATSOMPOP N CHAOCHANCHA KUL K Average mixing torque tensile and impact properties and thermal stability of Poly(vinyl chloride)/sawdust composites with different silane coupling agents[J]. *J Appl Polym Sci* 2005, 96: 231-221.
- [11] MALDAS D KOKTA B V Performance of hybrid reinforcements in PVC composites(II): Use of surface modified mica and different cellulose materials as reinforcements[J]. *J Vinyl Technol* 1993, 15(1): 38-44.
- [12] LAI S M YEH F C WANG Y et al Comparative study of maleated polyolefins as compatibilizers for polyethylene wood flour composites[J]. *J Appl Polym Sci* 2003, 87: 487-496.
- [13] SOMBATSOMPOP N PHROMCHIRASUK C Effects of acrylic-based processing aids on processibility rheology thermal and structural stability and mechanical properties of PVC/wood-sawdust composites[J]. *J Appl Polym Sci* 2004, 92: 782-790.
- [14] 生瑜,朱德钦,刘希荣.一种PVC基木塑复合材料加工新型多功能助剂的制备方法;中国,200910111534.0[P].2009-04-23.
- [15] 中华人民共和国质量监督检验检疫总局,中国国家标准化管理委员会.GB/T1040.1-2006塑料拉伸性能的测定[S].北京:中国标准出版社,2006.
- [16] 国家技术监督局.GB/T1043-1993硬质塑料筒支梁冲击试验方法[S].北京:中国标准出版社,1993.
- [17] LIX H MENG Y Z WANG S J et al Completely biodegradable composites of Poly(propylene carbonate) and short lignocellulose fiber *hildegardia populifolia*[J]. *J Polym Sci Part B* 2004, 42(4): 666-675.
- [18] ELMELIGY M G EL-ZAWAWY W K IBRAHIM M M Lignocellulosic composite[J]. *Polym Adv Technol* 2004, 15: 738-745.
- [19] GANAN P MONDERAGON I Surface modification of fique fibres: Effects on their physico-mechanical properties[J]. *Polym Compos* 2002, 23(3): 383-394.
- [20] VAN KREVELEN D W, HOFTYZER P J Properties of polymers: their estimation and correlation with chemical structure[M]. New York: Elsevier Scientific Pub Co 1976: 121-127.
- [21] WU S Polymer interface and adhesion[M]. New York: Marcel Dekker 1982: 102-106.
- [22] MARK J E Polymer data handbook[M]. New York: Oxford University Press 1999: 42.

(责任编辑 李文军)