

doi:10.3969/j.issn.1001-3539.2019.04.026

不同增容剂对 PE-HD / 竹粉复合材料的影响

张婷¹, 温宝琴²

(1. 新疆石河子职业技术学院, 新疆维吾尔自治区石河子 832000; 2. 石河子大学机械电气工程学院, 新疆维吾尔自治区石河子 832003)

摘要: 针对竹塑复合材料相容性差, 填料不易扩散的问题, 采用模压成型法制备高密度聚乙烯 / 竹粉 (PE-HD / 竹粉) 复合材料, 通过扫描电子显微镜 (SEM)、旋转流变仪等方式分析了硅烷偶联剂 (WD50)、树状聚合物 (PAMAM)、乙烯-甲基丙烯酸甲酯 (EMMA) 不同增容剂对 PE-HD / 竹粉复合材料形态结构、力学性能以及流变特性的影响。研究表明, 随着增容剂含量的增加, 不同增容剂增容的 PE-HD / 竹粉复合材料拉伸强度和冲击强度呈现出先上升后下降的趋势, PAMAM 增容剂较 EMMA 和 WD50 对 PE-HD / 竹粉复合材料的力学性能提高明显, 且 PAMAM 处理后的试样中竹粉很好地被 PE-HD 树脂完全包裹, 有效地提高了 PE-HD / 竹粉相交界面处的粘结力; 不同增容剂处理后的基体材料储能模量呈现下降趋势, PAMAM 处理的 PE-HD / 竹粉复合材料对竹粉界面改性作用优于 WD50 和 EMMA 两种增容剂, 当竹粉质量分数大于 50% 时, PAMAM 的三维球状结构更有利于竹粉在基体的分散作用, 实现了竹粉粒子与 PE-HD 分子链的降黏效果。

关键词: 高密度聚乙烯; 竹粉; 流变特性; 力学性能

中图分类号: TB332 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3539(2019)04-0128-06

Effect of Different Compatibilizers on PE-HD / Bamboo Powder Composites

Zhang Ting¹, Wen Baoqin²

(1. Shihezi Vocational and Technical College, Shihezi 832000, China; 2. School of Mechanical and Electrical Engineering, Shihezi University, Shihezi 832003, China)

Abstract : Aiming at the poor compatibility of bamboo-plastic composites and the difficulty of fillers diffusion, high density polyethylene(PE-HD) / bamboo powder composites were prepared by molding. Effects of different compatibilizers include silane coupling agent (WD50), ethylene-methyl methacrylate (EMMA), resinous polymer (PAMAM) on morphology, mechanical properties and rheological properties of PE-HD / bamboo powder composites were analyzed by means of SEM scanning electron microscope and rotary rheometer. The results show that with the increase of compatibilizer content, the tensile strength and impact strength of PE-HD / bamboo powder composites with different compatibilizers increase first and then decrease. The mechanical properties of PE-HD / bamboo powder composite are improved most obviously by PAMAM compatibilizer compared with EMMA and WD50. The sample by PAMAM treated, bamboo powder is well wrapped by PE-HD resin, which effectively improves the bonding force at the interface between PE-HD and bamboo powder. The storage modulus of the matrix material after different compatibilizers treatment show a downward trend. The modified effect of PE-HD / bamboo powder composite treated by PAMAM on bamboo powder interface is better than that of WD50 and EMMA. When the bamboo powder mass fraction is more than 50%, PAMAM's bamboo powder interfacial modification effect is better than that of WD50 and EMMA. Three-dimensional spherical structure is more favorable to the dispersion of bamboo powder in the matrix. The viscosity reduction effect of bamboo powder particle and PE-HD molecular chain is realized.

Keywords : high density polyethylene ; bamboo powder ; rheological property ; mechanical property

竹塑复合材料以优良的耐腐蚀性和较低的成本, 在建筑领域得到广泛的应用。如利用竹粉填充热塑性塑料, 采用挤出成型技术制备的枕木、建筑室外墙体、建筑板材等复合材料, 成本低廉, 且实现了

通讯作者: 张婷, 讲师, 研究生, 从事建筑工程项目管理, 施工技术、工程造价等工作 E-mail : wendy-wbq@163.com

收稿日期: 2019-01-21

引用格式: 张婷, 温宝琴. 不同增容剂对 PE-HD / 竹粉复合材料的影响 [J]. 工程塑料应用, 2019, 47(4) : 128-133.

Zhang Ting, Wen Baoqin. Effect of different compatibilizers on PE-HD / bamboo powder composites[J]. Engineering Plastics Application, 2019, 47(4) : 128-133.

循环利用。如利用竹塑复合材料质量轻、强度高、耐压耐冲蚀的优点来制造建筑结构承重墙体和屋顶屋面瓦等。然而在木质填料与基体树脂接触和浸润过程中,由于相容性较差,填料不易扩散,导致竹塑复合料加工成型困难,易发生熔体破裂,直接影响到材料的综合性能和推广应用^[1-4]。因而,针对复合材料的界面相容性问题,众多学者进行了许多研究^[5-7],如目前应用较多的界面浸润理论^[8]、摩擦理论^[9]、化学键理论^[10]等。同时也提出了一系列木质填充复合材料界面改性方式,包括对木质填料表面的处理^[11-14],如通过一定的物理和化学方法,通过减少竹料表面羟基含量来降低表面极性,提高基体树脂与填料的粘结强度^[15];对聚合物基体表面处理,通过在聚合物机体引入极性基团降低基体树脂非极性,提高复合材料的界面相容性^[16];添加偶联剂或增容剂,加入铝酸酯、钛酸酯、异氰酸酯等含有亲水基和疏水基的偶联剂提高材料界面相容性^[17-18]。

笔者在相关研究的基础上,以木塑复合材料的增容剂为研究点,分析了硅烷偶联剂(WD50)、树状聚合物(PAMAM)、乙烯-甲基丙烯酸甲酯(EMMA)共聚物对高密度聚乙烯(PE-HD)/竹粉复合材料性能的影响。

1 实验方法

1.1 主要原材料

PE-HD: 牌号 5000 s, 密度为 0.954 g/cm³, 熔体流动速率(MFR)为 0.7 g/10 min, 河南永正有限公司;

竹粉: 0.180 mm, 安庆威力有限公司;

PAMAM: 羟值为 400~600 mg KOH/g, 威海成华化工材料公司;

WD50 和 EMMA: 武大有机硅材料公司。

1.2 仪器及设备

电热恒温鼓风干燥箱: BPG-9000BH 型, 上海姚氏仪器设备厂;

高速混合机: YWJ-120T 型, 贝斯特机械有限公司;

热压机: HTF86×1 型, 苏州市美好精密机械有限公司;

万能制样机: WZY-240 型, 承德材料试验机厂;

万能拉力试验机: CMT4000 型, 山东华测机械设备有限公司;

简支梁冲击试验机: XJJ-5 型, 山东欧贝特试验有限公司;

平板硫化机: HZ-2004 型, 青岛鑫业飞机械有限公司;

扫描电子显微镜(SEM): JSM6390 LV 型, 日本 JEOL 公司。

1.3 试样制备

将 PE-HD、竹粉, 以及三种增容剂按照表 1~表 3 的配方制备试样。在进行试样制备过程中, 由于竹粉具有很高的亲水性, 因此在与 PE-HD 混合前对竹粉进行干燥处理。首先将竹粉置于温度为 80℃ 的电热恒温鼓风机中干燥 8 h, 按照乙醇: 硅烷偶联剂水溶液 10:1 的质量分数与干燥的竹粉在高速混合搅拌机中充分混合润湿, 放入真空干燥器中干燥备用。同样, 将 EMMA 和 PAMAM 与干燥竹粉根据一定比例进行混合润湿后, 放入烘箱烘至含水率 1% 以下。将处理后的竹粉与 PE-HD 在 145℃ 双辊开炼机上混炼 5 min 后, 并在温度为 180℃, 压力为 10 MPa 下模压成直径分别为 1 mm 和 4 mm 的试样。

表 1 WD50 增容 PE-HD/竹粉复合料配比 %

试样编号	材料		
	PE-HD	竹粉	WD50
1 [#]	100		
2 [#]	70	30	
3 [#]	60	40	
4 [#]	50	50	
5 [#]	69.5	30	0.5
6 [#]	69	30	1
7 [#]	68.5	30	1.5
8 [#]	68	30	2
9 [#]	67	30	3
10 [#]	65	30	5
11 [#]	63	30	7
12 [#]	60	30	10

表 2 EMMA 增容 PE-HD/竹粉的配方 %

试样编号	材料		
	PE-HD	竹粉	EMMA
13 [#]	69.5	30	0.5
14 [#]	69	30	1
15 [#]	68.5	30	1.5
16 [#]	68	30	2
17 [#]	67	30	3
18 [#]	65	30	5
19 [#]	63	30	7
20 [#]	60	30	10

1.4 性能测试

拉伸性能按照 GB/13022-1991 测试, 试样制成 50 mm×6 mm×4 mm 方形, 拉伸速率为 5 mm/min。

简支梁缺口冲击强度按照 GB/T 1043-1993 测

表3 PAMAM 增容 PE-HD/竹粉的配方 %

试样编号	材料		
	PE-HD	竹粉	PAMAM
21 [#]	69.5	30	0.5
22 [#]	69	30	1
23 [#]	68.5	30	1.5
24 [#]	68	30	2
25 [#]	67	30	3
26 [#]	65	30	5
27 [#]	63	30	7
28 [#]	60	30	10
29 [#]	95	0	5
30 [#]	85	10	5
31 [#]	75	20	5
32 [#]	65	30	5
33 [#]	55	40	5
34 [#]	45	50	5

试,各试样平均测试三组数据,获取平均值;

SEM 分析:采用 SEM 对液氮脆断后的试样断口界面进行形貌观察,并拍照。

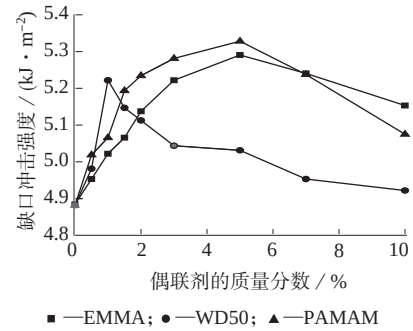
流变特性分析:将试样剪成直径为 25 mm,高为 1 mm 圆片置于试验平台;为保证测试样品始终处于线性黏弹区内,首先将试样置于 1 Hz 流变仪下进行动态正负扫描。设定应变量为 0.05%,再将试样置于 170℃,0.01~100 rad/s 扫描范围内进行频率扫描。

2 结果与讨论

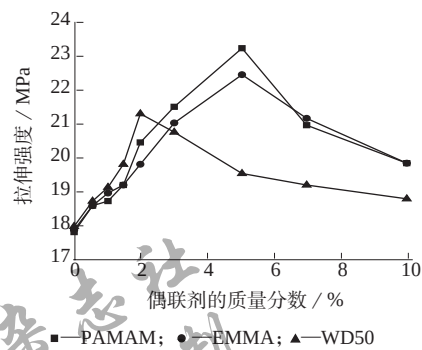
2.1 复合材料的力学性能

竹粉与 PE-HD 复合料界面相容性较差,为了保证 PE-HD/竹粉复合材料的性能,必须提高相容界面的粘结强度。图 1 为设定竹粉质量分数为 30%,WD50, PAMAM, EMMA 三种增容剂对竹粉处理后,PE-HD/竹粉复合材料的拉伸强度和缺口冲击强度。

由图 1 可以看出,不同增容剂下,随着增容剂含量的增加,试样的拉伸强度和缺口冲击强度呈现出先上升后下降的趋势,WD50 质量分数为 2% 时拉伸强度最大,相较于无增容剂的 PE-HD/竹粉复合材料的拉伸强度提高了 18.9%,质量分数为 1% 时获得最大的缺口冲击强度,相比于增容剂的 PE-HD/竹粉复合材料的缺口冲击强度提高了 7.6%。这是因为当偶联剂含量较少时,在复合材料中的覆盖率较低,难以全面覆盖竹粉,随着偶联剂含量的增加,对竹粉覆盖全面,提高了复合材料的强度,当质量分数增加到 2% 后,偶联剂形成应力集中点,导致性能开始下降。因此,WD50 的加入在一定程度上对 PE-HD/竹粉复合材料的力学性能有所改善,但



(a)



(b)

图 1 不同增容剂改性的 PE-HD/竹粉复合材料复合材料力学性能改善效果较低。

对比 PAMAM 和 EMMA 两类增容剂,当两种增容剂在体系中的质量分数保持在 5% 时,对复合材料的拉伸和缺口冲击强度改善最明显,其中 PAMAM 增容剂较 EMMA 增容剂改性的 PE-HD/竹粉复合材料力学性能提高更多。采用 PAMAM 改性的 PE-HD/竹粉复合材料获得最大拉伸和缺口冲击强度时相较 PE-HD/竹粉复合材料分别提高了 33.6% 和 38.9%。相关分析指出^[19],由于竹粉的脆断性,当向材料中添加了一定量的竹粉后容易导致复合材料的力学性能出现一定程度下降,当向复合材料中加入 PAMAM 及 EMMA 后,由于增容剂中存在的亲水基团能够直接与竹粉中的羟基相互作用,同时增容剂中的疏水部分与 PE-HD 高分子链相结合,改善了材料的界面相容性和力学性能。

对于 EMMA 增容剂,由于柔性链具有良好的抗冲击性,有效提高了复合材料的耐冲击性。PAMAM 为一种表面分布羟基的球状结构,这种结构在竹粉与 PE-HD 形成的分子链体系中充当着网状结构的交联点,当材料受到外力作用时,形成的应力集中在球状微粒点形成裂纹支化,有效地吸收了冲击作用的能量,提高了材料的耐冲击性^[20]。当增容剂质量分数超过 5% 时,由于增容剂刚度的影响

使得复合材料的力学性能下降^[21]。

上述分析可知, PAMAM 对复合材料的相容性改善最好。因此选择 PAMAM 的质量分数为 5% 时, 分析不同竹粉含量下 PE-HD/竹粉复合材料的力学性能。图 2 为不同竹粉含量下 PE-HD/竹粉复合材料(试样 29[#]~34[#])的力学性能。由图 2 可以看出, 随着竹粉含量的增加, 复合料的拉伸和冲击强度显著下降。这是由于竹粉和 PE-HD 为两类不相容相, 由于竹粉中存在氢键, 使其在 PE-HD 中不均匀分散, 当复合材料受到外力作用, 易在竹粉和 PE-HD 相交界面处产生应力集中, 且随着竹粉含量的增加, 在材料基体内越易形成分子团聚, 材料的应力集中越大, 进而导致复合材料的力学性能下降。

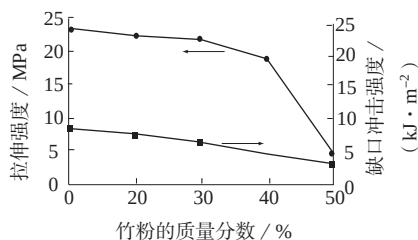


图 2 不同竹粉含量下的 PE-HD/竹粉复合材料的力学性能

2.2 复合材料的界面形貌

图 3 为未加增容剂的 2[#] 试样的 SEM 照片。由图 3 可以看出, 2[#] 试样未经增容剂处理, 导致竹粉和 PE-HD 基体间表现出明显的界限, 在竹粉周边存在明显缝隙以及竹粉脱落后孔洞, 表明竹粉和 PE-HD 界面间的粘结力较小, 在外力的作用下粘结在基体树脂上的竹粉极易脱落, 因而导致复合材料的力学性能较差。

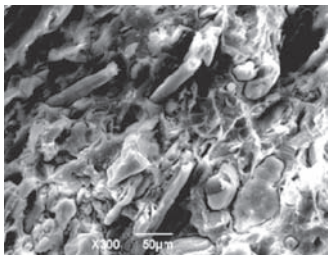
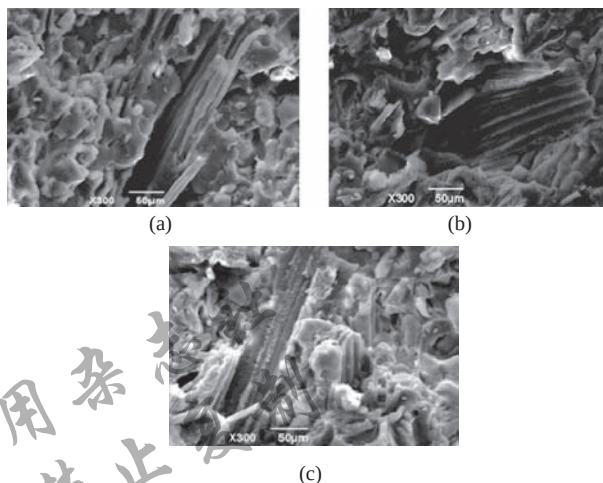


图 3 未添加增容剂的 2[#] 试样复合材料界面形貌的 SEM 照片

图 4 为加入质量分数为 5% 三种增容剂的 PE-HD/竹粉复合材料(10[#], 18[#], 26[#])的 SEM 照片。图 4a 为 10[#] 试样的界面形貌图, PE-HD/竹粉复合材料中加入质量分数为 5% 的 WD50 增容剂。相比于未处理的 PE-HD/竹粉复合材料, 界面的孔洞数量和直径明显减小, 竹粉周边并未观察到明显的缝隙, 表明竹粉与基体树脂间的相容性得到了部分改

善, 但界面处仍能观察到裸露的竹粉, WD50 对联结界面的相容性改善效果并未达到使用要求。图 4b 和图 4c 分别为 18[#] 试样, 26[#] 试样的断面形貌。可以看出, 竹粉很好地被 PE-HD 树脂完全包裹, 在界面处并未观察到明显的间隙, 表明相交界面处的粘结力得到有效提高, 当复合材料受到外力的冲击时, 相交界面能够很好地进行应力传递, 保证了材料界面的相容性和力学性能。



a—10[#] 试样; b—18[#] 试样; c—26[#] 试样

图 4 不同增容剂改性的 PE-HD/竹粉复合材料的 SEM 照片

2.3 复合材料的流变性能

竹塑复合材料的宏观性能和结构特征由竹粉和基体界面决定。流变学可获得复合材料内部结构和界面的黏弹信息。其中动态储能模量 (G')、损耗模量 (G'') 能有效地反映材料的弹性形变储能能力和能量耗散状况^[22]。图 5 为温度 170℃, 竹粉质量分数为 30%, WD50, PAMAM, EMMA 三种不同增容剂改性的 PE-HD/竹粉复合材料的 G' 和 G'' 随频率 (ω) 变化关系。

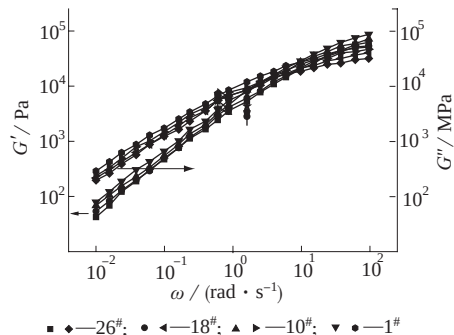


图 5 不同增容剂改性 PE-HD/竹粉复合材料的流变特性曲线

可以看出, 基体材料经过不同增容剂处理后的储能模量均表现出一定程度的下降, 表明加入增容剂后能够有效提高竹粉在基体中分散均匀度, 降低

了基体分子链和竹粉的缠绕,降低了复合材料的模量。对比三种不同增容剂改性复合材料的流变性的影响作用可以看出,PAMAM处理的复合材料具有更低的模量值,表明了PAMAM对竹粉界面改性作用更佳。

考虑到增容剂以及竹粉含量对复合材料的性能优化作用,研究增容剂掺入前后复合材料的模量变化趋势。图6示出1[#]~4[#],32[#],33[#],34[#]试样的 G' 随 ω 的变化关系。由图6可以看出,在低频端($\omega \leq 1 \text{ rad/s}$)区,PE-HD基体符合线性黏弹性特征,随着竹粉含量的不断增加, G' 、 G'' 曲线斜率逐渐增加,低频区的PE-HD体系模量逐渐偏离线性标度关系。这可能是由于体系内形成了粒子团聚等有序结构导致低频区具有更好的弹性,体系模量中的弹性模量分量不断增加,并最终偏离初始的黏弹模型。处于低频区复合材料中的 G' 对 ω 的依赖性要低于基体,随着竹粉含量的不断提高, $G' \sim \omega$ 曲线逐渐进入到低频平台区,对频率变化的敏感性下降,此时复合材料中形成了以竹粉粒子为基础的网状结构,使复合材料长期处于松弛单元^[23]。图中还可以看出,当竹粉质量分数大于50%时,加入PAMAM增容剂的PE-HD/竹粉复合材料的模量降低,表明PAMAM对体系界面的相容性有一定改善,这是由于PAMAM的三维球状结构更有利于竹粉在基体的分散作用,降低了竹粉粒子与PE-HD分子链的缠结作用,实现了降黏效果。当竹粉质量分数小于40%时,PAMAM的使用并未对复合材料的模量造成很大影响,这可能是界面结构还未发生松弛,因而观察不到复合材料的松弛信息。

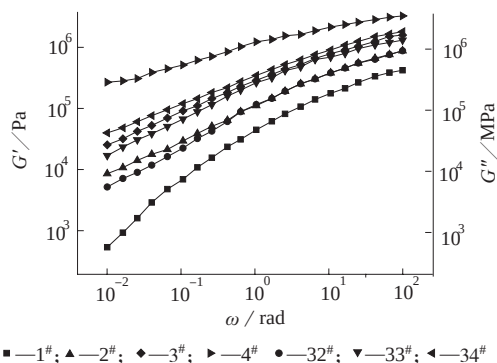


图6 不同竹粉含量的PE-HD/竹粉复合材料流变特性曲线

3 结论

(1) 随着增容剂含量的增加,不同增容剂增容的PE-HD/竹粉复合材料拉伸强度和缺口冲击强度呈现出先上升后下降的趋势。当WD50增容剂质量

分数为2%时,PAMAM和EMMA两类增容剂质量分数为5%时,对PE-HD/竹粉复合材料的拉伸和缺口冲击强度改善最为明显,其中PAMAM增容剂较EMMA对材料力学性能提升更强。

(2) 未经增容剂处理的复合材料界面的SEM照片看出,竹粉和PE-HD基体表现出明显的界限;WD50处理后的试样界面处仍能观察到裸露的竹粉,联结界面的相容性改善效果并不明显;PAMAM和EMMA处理后的试样中竹粉很好地被PE-HD树脂完全包裹,相交界面处的粘结力得到有效提高。

(3) 不同增容剂处理后的基体材料储能模量和损耗模量呈现下降趋势,加入增容剂能有效提高竹粉在基体中分散均匀度。其中PAMAM处理的体系对竹粉界面改性作用优于WD50和EMMA两类增容剂,当竹粉质量分数大于50%时,PAMAM的三维球状结构更有利于竹粉在基体的分散作用。

参考文献

- [1] 张庆法,杨科研,蔡红珍,等.稻壳/高密度聚乙烯复合材料与稻壳炭/高密度聚乙烯复合材料性能对比[J].复合材料学报,2018,35(11):3044-3050.
Zhang Qingfa, Yang Keyan, Cai Hongzhen, et al. Comparison of the properties of rice husk / high density polyethylene composite with rice husk carbon / high density polyethylene composite[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2018 (11):3044-3050.
- [2] 郝建秀,杜凤,王伟宏.短切碳纤维表面处理对木粉/高密度聚乙烯复合材料性能的影响[J].复合材料学报,2018,35(2):298-303.
Hao Jianxiu, Du Feng, Wang Weihong. Effect of surface treatment of short cut carbon fiber on properties of wood powder / high density polyethylene composites[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2018 (2):298-303.
- [3] 刘兰,杨建华.相变储能保温建筑材料的制备及性能评价[J].科技经济市场,2016(7):28-29.
Liu Lan, Yang Jianhua. Preparation and performance evaluation of phase change thermal insulation building materials[J]. Economic Market of Science and Technology, 2016 (7):28-29.
- [4] 王俊,郭力,孙彬彬,等.高密度聚乙烯的支链结构与黏弹性研究[J].化工科技,2016,24(6):6-10.
Wang Jun, Guo Li, Sun Binbin, et al. Research on branch chain structure and viscoelasticity of high-density polyethylene[J]. Chemical technology, 2016, 24 (6):6-10.
- [5] Lin Ziyin, Mcnamara A. Exfoliated hexagonal boron nitride-based polymer nanocomposite with enhanced thermal conductivity for electronic encapsulation[J]. Composites Science and Technology, 2014(9):28-31.
- [6] Yuan Fangyuan, Zhang Haobin, Xiao Feng. Synergistic effect

- of boron nitride flakes and tetrapod-shaped ZnO whiskers on the thermal conductivity of electrically insulating phenol formaldehyde composites[J]. *Composites Part A*, 2013(6):78–82.
- [7] Zhou Shaoxin, Xu Jinzao, Kang Feiyu. Experiments and modeling of thermal conductivity of flake graphite / polymer composites affected by adding carbon-based nano-fillers[J]. *Carbon*, 2013(19):218–311.
- [8] Xie Binhuan, Huang Xiao, Zhang Guojun. High thermal conductive polyvinyl alcohol composites with hexagonal boron nitride microplatelets as fillers[J]. *Composites Science and Technology*, 2013, 32(12):288–292.
- [9] 杨晓明,王铎,田耘. 纳米 MgO / 高密度聚乙烯复合材料的性能[J]. *复合材料学报*, 2016, 33(2):234–239.
- Yang Xiaoming, Wang Duo, Tian Yun. Properties of nano-sized MgO / high density polyethylene composites[J]. *Acta Materialiae Compositae Sinica*, 2016, 33 (2):234–239.
- [10] 祁蓉,齐暑华,王兆福,等. 高导热绝缘聚乙烯复合材料[J]. *粘接*, 2015, 36(5):37–42.
- Qi Rong, Qi Shuhua, Wang Zhaofu, et al. High thermal insulation polyethylene composites[J]. *Bonding*, 2015, 36(5):37–42.
- [11] 刘旭东,蒋永涛,李大纲. 热氧老化对稻壳粉 / 高密度聚乙烯复合材料抗弯强度的影响[J]. *林业机械与木工设备*, 2015, 43(4):17–18.
- Liu Xudong, Jiang Yongtao, Li Dagang. Effect of thermal oxygen aging on bending strength of rice husk powder / PE-HD composites[J]. *Forestry Machinery and Woodworking Equipment*, 2015, 43(4):17–18.
- [12] 杜凤,王伟宏. 碳纤维增强木粉 / 聚乙烯复合材料的制备及其力学性能[J]. *南京林业大学学报:自然科学版*, 2015, 39(2):132–136.
- Du Feng, Wang Weihong. Preparation and mechanical properties of carbon fiber reinforced wood powder / polyethylene composites [J]. *Journal of Nanjing Forestry University:Natural Science Edition*, 2015, 39(2):132–136.
- [13] Han Zhidong, Fina A. Thermal conductivity of carbon nanotubes and their polymer nanocomposites:A review[J]. *Progress in Polymer Science*, 2010(7):21–23.
- [14] Yang Kai, Gu Mingyuan. Enhanced thermal conductivity of epoxy nanocomposites filled with hybrid filler system of triethylenetetramine-functionalized multi-walled carbon nanotube / silane-modified nano-sized silicon carbide[J]. *Composites Part A*, 2009 (2):1 507–1 510.
- [15] Zhao Qian, Jiang Tingshun, Li Changsheng, et al. Synthesis of multi-wall carbon nanotubes by Ni-substituted (loading) MCM-41 mesoporous molecular sieve catalyzed pyrolysis of ethanol[J]. *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*, 2011(2):34–37.
- [16] 刘欢,季铁正,陈婷. 导电填料 / 高密度聚乙烯 (PE-HD) 导电复合材料的性能[J]. *炭素技术*, 2015, 34(1):6–9, 19.
- Liu Huan, Ji Tiezheng, Chen Ting. Research progress of conductive fillers / high density polyethylene (PE-HD) conductive composites[J]. *Carbon Technology*, 2015, 34 (1):6–9, 19.
- [17] 陈玲,黄润州,刘秀娟,等. 木粉、废旧橡胶和高密度聚乙烯复合材料的解热动力学特性[J]. *南京林业大学学报:自然科学版*, 2014, 38(6):135–140.
- Chen Ling, Huang Runzhou, Liu Xiujuan, et al. Kinetics of pyrolysis of wood flour, waste rubber and high density polyethylene composites[J]. *Journal of Nanjing Forestry University:Natural Science Edition*, 2014, 38(6):135–140.
- [18] 潘明珠,梅长彤,李国臣,等. 聚磷酸铵改善稻秸-高密度聚乙烯复合材料的理化性能[J]. *农业工程学报*, 2014, 30(16):328–333.
- Pan Mingzhu, Mei Changtong, Li Guochen, et al. Improvement of physicochemical properties of rice straw-high density polyethylene composites by ammonium polyphosphate[J]. *Journal of Agricultural Engineering*, 2014, 30(16):328–333.
- [19] Lizundia E, Oleaga A, Salazar A, et al. Nano-and microstructural effects on thermal properties of poly(l-lactide) / multi-wall carbon nanotube composites[J]. *Polymer*, 2012(12):12–14.
- [20] Ren Xuemei, Chen Changlun, Nagatsu M, et al. Carbon nanotubes as adsorbents in environmental pollution management:A review[J]. *Chemical Engineering Journal*, 2010 (2):80–84.
- [21] 任文涵,张丹,王戈,等. 竹浆板纤维 / 高密度聚乙烯复合材料的性能[J]. *东北林业大学学报*, 2014, 42(8):90–94, 122.
- Ren Wenhan, Zhang Dan, Wang Ge, et al. Thermal properties of bamboo pulp fiber / high density polyethylene composites[J]. *Journal of Northeast Forestry University*, 2014, 42(8):90–94, 122.
- [22] 王洪宇,隋国鑫. 果壳纤维 / 高密度聚乙烯复合材料的力学性能[J]. *科技导报*, 2014, 32(9):21–25.
- Wang Hongyu, Sui Guoxin. Mechanical properties of fiber / high density polyethylene (PE-HD) composites of cortex lucifera[J]. *Science and Technology Bulletin*, 2014, 32(9):21–25.
- [23] 何文,庄文皎,蒋身学,等. 马来酸酐接枝聚乙烯对竹粉 / 高密度聚乙烯复合材料性能的影响[J]. *林产工业*, 2014, 41(2):12–14, 18.
- He Wen, Zhuang Wenjiao, Jiang Shenxue, et al. Effect of maleic anhydride grafted polyethylene on properties of bamboo powder / PE-HD composites[J]. *Forest products Industry*, 2014(2):12–14, 18.