

doi:10.3969/j.issn.1674-7100.2015.04.003

# 可连续生产的生物质包装材料配方与工艺研究

王礼银<sup>1</sup>, 韩霖<sup>1</sup>, 肖文飞<sup>1</sup>, 谭明曦<sup>1</sup>, 章宇恒<sup>1</sup>,  
于敏<sup>1</sup>, 孙昊<sup>1,2</sup>, 钱怡<sup>1,2</sup>, 张新昌<sup>1,2</sup>

(1. 江南大学 机械工程学院, 江苏 无锡 214122; 2. 江苏省食品先进制造装备技术重点实验室, 江苏 无锡 214122)

**摘要:** 目前国内外对于生物质包装材料的研究多采用热压成型工艺, 以淀粉、纤维及增塑剂等为基材进行制备, 其生产效率较低, 且原料中一般都含有对环境有害的成分。因此, 以绿色环保的废纸纤维、淀粉生物质材料、丙三醇等为原料, 采用正交试验法, 研究了一种可连续生产的环保型生物质包装材料挤出式加工最佳工艺及其配方。结果表明: 生产环保型生物质包装材料的最佳配方为质量分数为 11% 的淀粉、11% 的丙三醇、78% 的废纸纤维, 且原材料的含水率为 80%; 最佳工艺为螺杆挤出机的 3 段温度分别设定为 65, 65, 80 °C, 螺杆转速为 45 r/min。在选定的最佳配方与工艺条件下, 所制备的生物质包装材料试样的性能最优, 并可实现连续生产。

**关键词:** 生物质材料; 连续生产; 缓冲性能; 抗压强度

**中图分类号:** TB484.6; TQ223.14<sup>+</sup>2 **文献标志码:** A **文章编号:** 1674-7100(2015)04-0013-06

## Study on Formula and Process of Continually Producing Biomass Packing Material

Wang Liyin<sup>1</sup>, Han Lin<sup>1</sup>, Xiao Wenfei<sup>1</sup>, Tan Mingxi<sup>1</sup>, Zhang Yuheng<sup>1</sup>,  
Yu Min<sup>1</sup>, Sun Hao<sup>1,2</sup>, Qian Yi<sup>1,2</sup>, Zhang Xinchang<sup>1,2</sup>

(1. Mechanical Engineering College, Jiangnan University, Wuxi Jiangsu 214122, China;

2. Jiangsu Provincial Key Laboratory of Advanced Food Manufacturing Equipment and Technology, Wuxi Jiangsu 214122, China)

**Abstract:** At present, hot briquetting technology is normally used in domestic and overseas research of biomass packing materials which are prepared with starch, fiber and plasticizing agent as the base materials. Due to its production inefficiency and environmentally harmful elements in raw materials, by adopting orthogonal experiment method, the optimal extruding process and formula for continually producible biomass packing materials were researched by taking the green paper fiber, starch biomass material and glycerol as raw materials. The results showed: the best formula for producing biomass packaging materials was with 11% starch, 11% glycerol and 78% recycled paper fiber, with 80% moisture in raw materials. The optimal process was under the condition of three section temperature of the extruder being set at 65 °C, 65 °C, 80 °C respectively and the screw rotation speed being 50 r/min. With the optimal formula and process condition, the produced biomass packaging material sample had an optimal performance and it could be continually produced.

**Key words:** biomass materials; continual production; cushioning properties; compressive strength

收稿日期: 2015-05-25

基金项目: 江苏省高等学校大学生实践创新训练计划基金资助项目(201410295039X), 江南大学卓越课程建设基金资助项目(江大教[2013]221号)

作者简介: 王礼银(1994-), 女, 湖南浏阳人, 江南大学学生, 主要研究方向为包装材料学, E-mail: 602587260@qq.com

通信作者: 张新昌(1961-), 男, 河南南阳人, 江南大学教授, 主要从事包装材料及制品, 产品包装整体解决方案方面的教学与研究, E-mail: zxc89@126.com

## 1 研究背景

近年来,大量包装废弃物带来的资源浪费和环境污染已越来越引起人们的重视,国内外包装行业也越来越关注提高环境指标,提倡使用新型的节能、可降解包装材料。植物纤维、淀粉等生物质材料是容易获取的可再生资源,其中的主要成分——木质素和纤维素每年约以1 640亿t的速度再生<sup>[1]</sup>。生物质材料具有价格低廉、无毒无害、密度小、比强度和比模量高、加工能耗小、生态环境相容性好等优点,是近年来包装材料领域的研发热点之一。目前,国内外在该领域的研究主要包括原材料配方、制备工艺及设备研究。传统生产方法的材料配方多以淀粉、纤维及增塑剂等为基材,且常采用热压方式为其成型方法,不仅生产效率较低,而且在制品种类方面也大受局限。

当前,国内许多科研工作者和科研院所都在进行生物质包装材料生产技术的研究和开发。如彭慧丽等人<sup>[2]</sup>首次提出了生物质材料的挤出法加工工艺,并且对挤出过程中生物质纤维物料加工流变性能,以及不同配方废纸纤维与淀粉之间的混合均匀性进行了研究,探讨了淀粉种类、淀粉含量和增塑剂配比等对物料体系加工性能的影响。李刚<sup>[3]</sup>研制了以植物纤维、淀粉及其他助剂为原料的生物质缓冲包装材料,并且探讨了其配方成分、原料预处理方式、物料流变特性等对制品缓冲性能的影响,且对其生产工艺及配方进行了优化。张明珠<sup>[4]</sup>研究了以木质纤维、热塑性塑料、偶联剂为配方物料的比例,探讨了工艺条件下木塑复合材料的加工使用性能,并设计出了单螺杆挤出设备,实现了木塑复合材料的连续挤出生产。

现有生物质包装材料的研究多以植物纤维(废纸或农业废弃物秸秆纤维)为主要原材料,与淀粉以及增塑剂等混合后,经过真空吸附或加热模压而得到包装材料成品,均属于间歇式生产,加工工艺较为复杂,耗时较长,成本较高,设备投资较大,能耗较高,功效较低,且原材料中含有对环境有害的成分;受生产工艺的影响,产品的种类有限。已有的挤出法生产工艺主要被应用于木塑复合材料。文献<sup>[2]</sup>的研究尽管实现了生物质材料的挤出法生产,但是其使用了大量的增塑剂,制备的样品性能也与实际需要存在较大差距。基于此,可以从原材料配方和样品制备工艺等方面对生物质包装材料进行深入研究。

丙三醇 $C_3H_8O_3$ 是一种脂肪水解物,为可食用、无

污染性的增塑剂<sup>[5]</sup>;聚乙烯醇(polyvinylalcohol, PVA)的原材料来源丰富,可以在80~90℃的水中溶解,是一种无毒无味的黏合剂,对环境污染较小<sup>[6]</sup>。因此,本研究以绿色环保的废纸纤维、淀粉生物质材料、丙三醇、聚乙烯醇为原料,通过原理性试验和正交试验,研究了可连续生产的生物质包装材料挤出式加工工艺,并且提出一种新的基于挤出工艺的生物质材料配方及其制备方法,以期为进一步研究新型生物质包装材料加工工艺和加工设备等奠定一定的理论基础。

## 2 试验材料和方法

### 2.1 试验材料及设备

选用的试验材料主要包括:

1) 废旧瓦楞纸板(old corrugated container, OCC),取自国内某纸业有限公司,来源为工厂加工后丢弃的废料,以及废纸回收;

2) 玉米淀粉,生化试剂(biochemical reagent, BR),北京鸿润宝顺科技有限公司;

3) 马铃薯淀粉,生化试剂BR,国药集团化学试剂有限公司;

4) 丙三醇 $C_3H_8O_3$ ,分析纯(analytical reagent, AR),上海誉洁化工股份有限公司;

5) 聚乙烯醇,国药集团化学试剂有限公司。

选用的试验设备主要包括:

1) JCS-600 电子天平,凯丰集团有限公司制造;

2) TD7-PFI 立式磨浆机,咸阳通达轻工设备有限公司制造;

3) DHG-9075A 电热鼓风干燥箱,上海一恒科学仪器有限公司制造;

4) HH-4A 数显恒温水浴锅,常州恒隆仪器有限公司制造;

5) JB 系列搅拌机,南京英美尔科技开发有限公司制造;

6) 单螺杆塑料挤出机,宜兴市凌霞塑料机械有限公司制造。

### 2.2 试验方法

本文采用正交试验设计法,由原理性试验确定试验因素及水平数,设计了2个4因素3水平的正交试验。

#### 2.2.1 原理性试验及结果

1) 试验安排

为了确定正交试验因素及其取值范围,设计了原理性试验,其因素水平见表1。

表1 原理试验因素与水平

Table 1 The factors and levels of the principle test

类别	因素	水平		
工艺参数	第一段加热温度/℃	50	80	100
	第二段加热温度/℃	50	80	100
	第三段加热温度/℃	50	80	100
原料配比	螺杆转速/(r·min <sup>-1</sup> )	30	40	50
	废纸纸浆质量分数/%	60	70	80
	丙三醇质量分数/%	20	15	10
	马铃薯淀粉质量分数/%	15	13	10
	聚乙烯醇质量分数/%	5	2	0

在单因素原理性试验过程中发现:当聚乙烯醇和淀粉的混和质量分数为65%、丙三醇的质量分数为15%、马铃薯淀粉的质量分数为15%、聚乙烯醇的质量分数为5%、含水率为80%、设定螺杆挤出机的转速为40 r/min、挤出端的3段温度均设定为80℃时,挤出的生物质包装材料试样成型效果较好,符合预期试验效果。

根据所得原理性试验结果,可以确定设定的各基本参数的比例的大体范围,然后采用正交试验的因素及其取值范围进行试验,并且对原材料配方以及工艺参数试验因素对试样性能的影响进行进一步分析,可最终确定最优原料配比以及最佳的工艺参数组合。

## 2) 试验步骤

生物质包装材料挤出试验包括材料初步处理、基材(废旧瓦楞纸板)与助剂材料在常温搅拌下混合、水浴加热、挤出成型、制品后期处理等步骤,具体的工艺流程如图1所示。

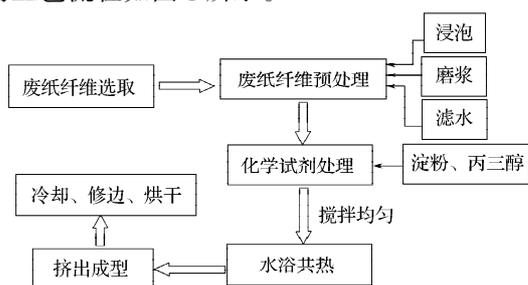


图1 生物质包装材料挤出工艺流程

Fig. 1 Process flow diagram of extrusion process of biomass packing material

1) 碎浆和磨浆。首先,将废弃瓦楞纸板经反复冲洗后浸泡至少24 h,然后放入水力碎浆机中进行碎浆处理。

2) 滤水。将经过碎浆处理后的废纸纤维置于过滤网内进行过滤,直至废纸纤维中的含水率为80%~85%。为保证废纸纤维的含水率符合要求,用烘箱法测定其含水率。

3) 预处理。将按比例调制好的聚乙烯醇、淀粉、丙三醇与废纸纤维一同放入 HENSHEL 高速固体搅拌机中进行混合。

4) 水浴共热。在标准试验温度下,将经过预处理所得的物料放入电热恒温水浴锅中,保持85℃温度持续水浴加热30 min,制得混合物料。

5) 试样挤出。将混合物料放入螺杆挤出设备进行挤出加工。挤出机机头的3段加热温度均设定为80℃,螺杆转速设定为45 r/min。

6) 制品后期处理。将挤出的制品放入鼓风干燥箱中进行干燥,干燥温度为50℃,干燥时间为8 h,直到成品含水率在10%以下,然后进行整平处理,即制得环保生物质材料试样。

## 2.2.2 正交试验

为考察加工工艺参数及其配方对试样性能的影响,本文设计了2组正交试验。

### 1) 工艺参数对试样性能的影响

根据原理性试验结果,确定试验一——工艺参数的影响因素及水平,具体见表2。

表2 工艺参数的影响因素与水平

Table 2 The influencing factors and levels of technological parameters

水平	因素			螺杆转速 / (r·min <sup>-1</sup> )
	加热温度/℃			
	第一段	第二段	第三段	
1	50	50	50	35
2	65	65	65	40
3	80	80	80	45

### 2) 原料比对试样性能的影响

根据原理性试验结果,确定试验二——原料配比的影响因素及水平,具体见表3。

表3 原料配比的影响因素与水平

Table 3 The influencing factors and levels of raw material ratio

水平	因素			
	含水率	淀粉比例	丙三醇比例	聚乙烯醇比例
1	70	11	11	0
2	75	13	13	2
3	80	15	15	5

## 2.2.3 性能测试方法

挤出试样干燥后,将其切成30 mm × 15 mm × 8 mm大小的试样块;然后参照GB/T1928—2009《木材物理力学试验方法总则》中的要求进行抗压强度测试,以分析试样得到最佳强度时的因素组合及工艺参数。

### 1) 试样的选取与准备

对不同因素水平条件下制备的材料,选取等尺

寸的试样, 取样规格为 30 mm × 15 mm × 8 mm。按 GB/T1928—2009 中的要求检验试样, 并且调整试样的含水率。完成上述过程后, 将所制备的试验试样保持在温度为 (20 ± 2) °C、相对湿度为 (65 ± 3)% 的密闭空间中, 待用。

2) 抗压强度测试

将所制备的试样依次放在试验机球面活动支座的中心位置处, 然后以匀速施加载荷。由于试样为变形量较大的轻质生物质材料, 根据已有经验, 以压缩变形量 15% 时的抗压力计算试样的抗压强度。即在 1.5~2.0 min 之内将试样压缩至试样的允许变形量 (按 15% 压力率计, 压缩量为 1.2 mm), 并且记录载荷值 (精度为 0.1 N)。

3) 数据处理与计算

参考 GB/T 1935—2009 《木材顺纹抗压强度试验方法》中的相关内容, 计算含水率为 12% 时的试样抗压强度, 计算公式如下:

$$\sigma_w = \frac{P}{l \times b}$$

式中:  $\sigma_w$  为试样含水率为 W 时的抗压强度, MPa;

P 为载荷, N;

l 为试样长度, mm;

b 为试样宽度, mm。

3 试验结果与分析

3.1 试验结果

所得正交试验结果具体参见表 4 和表 5。

表 4 试验 1 正交试验结果

Table 4 The orthogonal experiment results of test one

试验号	因素水平				试验指标 形变 15% 所需 应力 /MPa
	加热温度			螺杆 转速	
	第一段	第二段	第三段		
1	1	1	1	1	0.55
2	1	2	2	2	2.38
3	1	3	3	3	2.13
4	2	1	2	3	1.72
5	2	2	3	1	2.21
6	2	3	1	2	2.08
7	3	1	3	2	1.91
8	3	2	1	3	2.13
9	3	3	2	1	1.51
$K_1$	5.06	4.18	4.75	4.27	
$K_2$	6.02	6.73	5.61	6.37	
$K_3$	5.54	5.71	6.25	5.98	
$b_1$	1.68	1.39	1.58	1.42	
$b_2$	2.00	2.24	1.87	2.12	
$b_3$	1.85	1.90	2.08	2.00	
$R_1$	0.32	0.85	0.50	0.70	

表 5 试验 2 正交试验结果

Table 5 The orthogonal experiment results of test two

试验号	因素水平			试验结果 形变 15% 所需 应力 /MPa	
	含水率	淀粉 比例	丙三醇 比例		聚乙烯醇 比例
10	4	4	4	4	2.38
11	4	5	5	5	2.12
12	4	6	6	6	2.15
13	5	4	5	6	2.31
14	5	5	6	4	2.05
15	5	6	4	5	2.01
16	6	4	6	5	2.36
17	6	5	4	6	2.30
18	6	6	5	4	1.87
$K_4$	6.30	6.65	7.04	6.69	
$K_5$	6.48	6.37	6.47	6.30	
$K_6$	6.76	6.53	6.02	6.56	
$b_4$	2.10	2.22	2.35	2.23	
$b_5$	2.16	2.10	2.16	2.10	
$b_6$	2.25	2.18	2.01	2.19	
$R_2$	0.15	0.09	0.34	0.13	

表 4 和表 5 中:

1) 试验号的右边, 因素水平的下边部分的 1, 2, 3 (4, 5, 6) 分别代表某因数的 1, 2, 3 (4, 5, 6) 这 3 个水平。

2)  $K_i$  为某因素的 i 水平的 3 个试验数据相加。

如: 螺杆转速的  $K_1$ ,

$K_1$  = 螺杆转速的 1 水平的 3 个试验数据相加 = 1 号试验结果 + 5 号试验结果 + 9 号试验结果 = 0.55 + 2.21 + 1.51 = 4.27。

3)  $b_i = K_i / 3$ 。  $b_i$  即为某因素某水平对试验指标的影响。

4) 极差  $R_i$  为  $b_1, b_2, b_3$  的极差 (或者  $b_3, b_4, b_5$  的极差), 即最大值和最小值之差。

3.2 工艺参数对试样性能的影响分析

图 2 所示为试验所得工艺参数对试样抗压性能的影响结果。

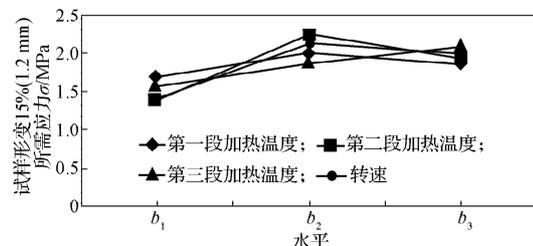


图 2 工艺参数对试样抗压性能的影响

Fig. 2 Effects of technological parameters on samples' compressive properties

由图 3 可知, 3 个因素水平中, 第二段加热温度的波动最大, 所以它对试样抗压性能的影响最大。

分析图 3 中的曲线走势, 可以发现, 第二加热段

温度、螺杆转速和第一加热段温度均在水平2处抗压强度达最大值,而第三加热段温度的应力最大值出现在水平3处,根据这一规律可确定其工艺参数的最佳组合为65℃,65℃,80℃,45 r/min。

### 1) 加热段温度设定值的影响

由试验结果可知,当螺杆挤出机由进料口至出料口的第一段、第二段以及第三段加热加压段的温度都设定为100℃时,挤出机腔内水分受热蒸发,物料中含水量减少,会造成挤出过程中出现粘壁现象,因而导致挤出机腔堵塞,无法挤出物料;当各段温度设定为90℃时,部分水从物料口溢出,发生喷浆现象,物料无法连续成型;当各段温度设定低于50℃时,物料塑性降低,导致挤出困难。试验结果表明,当3段温度设定为65,65,80℃时,挤出的生物质包装材料试样抗压性能最优,且3个因素中对材料抗压性能影响最大的是挤出机第二段的加热温度。

### 2) 螺杆转速的影响

螺杆转速设定为 $\leq 30$  r/min时,挤出压力较小,挤出时间较长,物料在挤出过程中长时间加热导致纸纤维相互联接性差,成型后的材料物理性能差,甚至难以成型,无法实现连续生产。螺杆转速设定大于45 r/min时,挤出压力过小,挤出时间过短,物料在挤出过程中加热时间不够,导致物料中的淀粉未完全糊化,纸纤维未完全联接,成型后的材料抗压强度不够。试验结果表明,在40~45 r/min的转速下,能兼顾材料连续性及抗压强度,材料性能最好,因此,最终确定最佳转速为45 r/min。

## 3.3 原料配比对试样性能的影响分析

试验所得原料配比对试样抗变形能力的影响结果如图3所示。

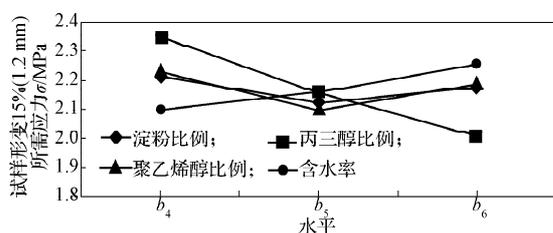


图3 原料配比对试样抗压性能的影响

Fig. 3 Effects of raw material ratio on samples' compressive properties

由图3可知,3个因素水平中,丙三醇的波动最大,所以确定其对试样抗压性能的影响最大。

分析图3中的曲线走势,淀粉比例、丙三醇比例、聚乙烯醇比例均在水平4处抗压强度达最大值,含水率的应力最大值出现在水平6处,根据这一规律可确定其原料配方的最佳组合为11%,11%,0,80%。

### 3.3.1 含水率的影响

当含水率 $\geq 85\%$ 时,挤出的物料质地松软,甚至发生喷浆现象,材料试样黏结性能差;含水率 $\leq 75\%$ 时,由于缺少水分,物料在挤出机内混合不够均匀,易出现断裂现象,并且物料会残留在螺杆挤出机中,难以实现连续挤出;当含水率为80%时,挤出的生物质包装材料试样的力学性能最适当。

### 3.3.2 淀粉比例的影响

淀粉含量过低时,废纸纤维黏结性差,无法形成搭接,样品的抗压强度低,难以连续挤出成型;淀粉含量过高时,出现粘壁现象,且生产成本较高。试验结果表明,当淀粉的添加质量分数为11%时,挤出的生物质包装材料试样的性能最佳。

### 3.3.3 丙三醇比例的影响

丙三醇作为试验增塑剂,可增加植物纤维分子的流动性,并使其柔软而更具有可塑性。将丙三醇的添加质量分数设定为10%时,发现物料在挤出过程中会发生粘壁现象,难以挤出,丙三醇比例越少,粘壁现象越明显,所以丙三醇比例不应小于10%。通过正交试验得到丙三醇的添加质量分数为11%时,挤出的生物质包装材料的外观最平整,挤出连续性及力学性能最佳。同时,试验结果表明,丙三醇也是对抗压性能影响最大的因素。

### 3.3.4 聚乙烯醇比例的影响

试验中,螺杆挤出机的3段温度均低于80℃时,聚乙烯醇无法在挤出过程中熔化。若聚乙烯醇在配方混合前进行初步水浴加热,耗时太久,增加了试验工序的复杂性。同时,试验结果表明,聚乙烯醇的含量对材料的力学性能和外观没有明显的影响,因而,在最佳配方组分中可以去掉这一原料。

## 3.4 产品表征

由正交试验所得最佳工艺与原料配方制得的挤出试样见图4。



图4 挤出试样

Fig. 4 Extrusion sample

图4所示挤出试样与试验1中2号试样、试验2中1号试样相比,其抗变形能力更强,从而验证了所

得出正交试验结果的准确性。

## 4 结论

本文研究了可连续生产的生物质包装材料挤出式加工工艺,以及以绿色环保的废纸纤维、淀粉生物质材料和丙三醇为原料的最佳生产配方。通过原理试验、正交试验法及试样性能测试分析,可得出如下结论:

1) 最佳原料配比。可实现生物质包装材料挤出加工工艺的最佳原材料配方如下:含水率为80%,淀粉的添加质量分数为11%,丙三醇的添加质量分数为11%,废纸纤维的添加质量分数为78%。其中,丙三醇是对试样抗压性能影响最大的因素。

2) 最佳工艺参数。本试验的最佳工艺参数如下:螺杆挤出机的3段温度分别设定为65, 65, 80 °C,转速为45 r/min。其中,螺杆挤出机中间段温度对试样抗压性能的影响最为显著。

采用本研究所确定的工艺参数和原材料配方,可制备表面性能平整美观、综合性能良好的生物质包装材料试样。所得试样具有良好的塑性、韧性和抗压等机械性能,经初步分析,可被用于填充、缓冲等包装场合。若对目标产品有不同性能要求,可适当调整挤出机中间段温度及丙三醇的含量,如目标产品要求材料性能较硬,强度要求较高,则可适当降低淀粉及丙三醇的比例,但不能低于10%。

本文的研究对连续法高效生产植物纤维基生物质包装材料的工程应用奠定了良好的基础,对开拓新型生物质包装材料、提高生产效率、降低成本有较大意义。但由于本文仅对挤出生物质包装材料试样的抗压性能进行了初步研究,作为包装材料,尚需要对试样的其他性能及不同材料组分的挤出法加工工艺做进一步研究。

## 参考文献:

- [1] 王立元,王建清. 淀粉和纤维在生物降解包装材料中的应用[J]. 包装世界, 2004(5): 40-43.  
Wang Liyuan, Wang Jianqing. Application of Starch and Fiber on Biodegradable Packaging Materials[J]. Packaging World, 2004(5): 40-43.
- [2] 彭慧丽,孙昊,张新昌. 基于挤出工艺的生物质纤维物料加工流变性能[J]. 包装工程, 2014, 35(11): 53-58.  
Peng Huili, Sun Hao, Zhang Xinchang. Rheological Properties of Biomass Fiber Material Based on Extrusion Process[J]. Packaging Engineering, 2014, 35(11): 53-58.
- [3] 李刚. 生物质缓冲包装制品浆料流变性及缓冲特性研究[D]. 济南: 山东大学, 2013.  
Li Gang. The Study of Biomass Cushioning Packaging Products' Slurry Rheology and Cushioning Properties[D]. Jinan: Shandong University, 2013.
- [4] 张明珠. 木质纤维填充热塑性塑料复合材料与挤出成型的研究[D]. 北京: 北京化工大学, 2001.  
Zhang Mingzhu. Research on Wood Fiber Filled Thermoplastic Composites and Extrusion[D]. Beijing: Beijing University of Chemical Technology, 2001.
- [5] 顾彦龙. 丙三醇作为绿色溶剂在有机反应中的应用[C]//中国化学会第27届学术年会第01分会场摘要集. 厦门: [出版者不详], 2010: 252-253  
Gu Yanlong. Glycerin's Application as a Green Solvent in Organic Reactions[C]//Chinese Chemical Society 27<sup>th</sup> Annual Meeting Abstracts 01 Sub-Venues. Xiamen: [s.n.], 2010: 252-253.
- [6] 孙奎洲. 绿色铸造粘结剂: 聚乙烯醇(PVA)的研究[J]. 江苏技术师范学院学报, 2002, 8(4): 88-92.  
Sun Kuizhou. Green Casting Adhesive: Research into PVA [J]. Journal of Jiangsu Teachers University of Technology, 2002, 8(4): 88-92.

(责任编辑: 廖友媛)