

# 金属粉/利乐包电磁屏蔽复合材料的制备及性能研究

朱燕玲<sup>1</sup>, 袁丽春<sup>1</sup>, 谭永川<sup>1</sup>, 熊雪平<sup>2</sup>, 徐长妍<sup>1</sup>

(1. 南京林业大学, 南京 210037; 2. 海南昆仑木业有限公司, 海口 570100)

**摘要:** 分别以铜、镍、铁粉与利乐包装废弃物、HDPE、硅烷偶联剂为原材料, 制备了金属粉/利乐包的电磁屏蔽复合材料, 研究了不同金属粉体积分数对复合材料的力学性能、耐水性能及电磁屏蔽效能的影响。结果表明, 材料的弯曲模量随体积分数的增加基本呈现上升的趋势; 随着体积分数的增加, 材料的 24 h 吸水厚度膨胀率和 24 h 吸水率均减小, 耐水性依次为 Ni/利乐>Fe/利乐>Cu/利乐; 金属粉填充量的增加没有显著提高电磁屏蔽效能, 电磁屏蔽效能的大小依次为 Cu/利乐>Ni/利乐>Fe/利乐。

**关键词:** 金属粉; 利乐包装废弃物; 电磁屏蔽; 力学性能; 耐水性

**中图分类号:** TB34 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3563(2013)19-0042-06

## Preparation and Performance of Metal Particle/Tetra Pak Electromagnetic Shielding Composites

ZHU Yan-ling<sup>1</sup>, YUAN Li-chun<sup>1</sup>, TAN Yong-chuan<sup>1</sup>, XIONG Xue-ping<sup>2</sup>, XU Chang-yan<sup>1</sup>

(1. Nanjing Forestry University, Nanjing 210037, China; 2. Kunlun Wood Industry Co., Ltd., Haikou 570100, China)

**Abstract:** A novel electromagnetic shielding composite was prepared by using metal particle (Cu, Ni, Fe), tetra pak waste, HDPE, and silane coupling agent. Effect of volume fraction of metal particle was studied on mechanical properties, water resistance, and electromagnetic shielding effectiveness. The results indicated that the flexural modulus rises with the increase of volume fraction on the whole; 24 h thickness swelling rate and corresponding water absorption rate both declines with the increase of volume fraction, and the rank of water resistance is Ni/tetra pak>Fe/tetra pak>Cu/tetra pak; volume fraction doesn't improve the SE value significantly, and the rank of SE value is Cu/tetra pak>Ni/tetra pak>Fe/tetra pak.

**Key words:** metal particle; tetra pak; electromagnetic shielding; mechanical properties; water resistance

我国利乐包装的使用量非常庞大, 作为乳类饮品的主流包装, 这种无菌复合材料主要由纸、铝、塑料经过一定的方式复合而成, 质量分数分别为 75%、5%、15%。事实上, 纸张的原料为 100% 的针叶木优质长纤维漂白纸浆, 铝箔的生产排污严重且价格昂贵, 在一次性使用并抛弃后, 严重地浪费资源、破坏环境<sup>[1-3]</sup>。目前利乐包装的回收再利用主要采用水力再生浆技术、木塑技术和彩乐板技术<sup>[4-10]</sup>。2010 上海世博会上的环保长椅和环保小方凳就是用利乐包装废弃物制成。另一方面, 随着现代科学技术的飞速发展, 各种电磁设备在军事、通讯、医学、工农业等领

域和日常生活中得到越来越广泛的应用, 在给人们带来便利的同时, 这些电磁射线也被公认为继大气污染、水质污染、噪声污染之后的第四大公害<sup>[11]</sup>。电磁屏蔽的原理是将电磁辐射限制在规定的空间, 阻止它传播与扩散, 一般是用金属材料屏蔽电磁波, 其优点是屏蔽效果好、价格适中, 缺点是密度大、易氧化、加工成形方式单一<sup>[12-13]</sup>。

利乐包装中含金属铝箔, 因此笔者采用利乐包装废弃物填充一定量的金属粉来制备具有电磁屏蔽性能的复合材料。利用金属粉制备的材料可以避免加工成形方式单一的束缚, 采用挤出或注射的方法来制

收稿日期: 2013-07-10

基金项目: 江苏省研究生科研创新计划项目 (CX12\_0526)

作者简介: 朱燕玲 (1989 -), 女, 江苏人, 南京林业大学硕士生, 主攻包装废弃物回收利用。

通讯作者: 徐长妍 (1967 -), 女, 土家族, 博士, 南京林业大学副教授, 主要从事包装材料、工艺和运输包装的教学与研究。

备,并且通过降低功能材料的厚度或使用共挤设备可以达到降低材料密度的目的。

## 1 实验

### 1.1 材料

实验材料:铜粉(Cu)、镍粉(Ni)、铁粉(Fe),400目,无锡顺达金属粉末有限公司;利乐包装废弃物,纸、塑料、铝的质量分数分别为75%,20%,5%,内蒙古伊利实业集团股份有限公司;高密度聚乙烯(HDPE),5000 S,中国石化公司;硅烷偶联剂KH550( $\gamma$ -氨丙基三乙氧基硅烷),南京曙光化工集团有限公司;无水乙醇,分析纯,南京化学试剂有限公司。

### 1.2 电磁屏蔽材料的制备

废弃纸铝塑包装经碎纸机、微型植物粉碎机2道工序制成颗粒直径为50  $\mu\text{m}$ 的利乐粉末,在100  $^{\circ}\text{C}$ 的电热恒温鼓风干燥箱中干燥备用。经过前期对硅烷偶联剂和钛酸酯偶联剂处理金属粉体的研究发现,将占处理粉体质量1.0%的硅烷偶联剂,在混炼过程中直接加入,这样处理金属粉的效果最为优异。偶联剂在适当的条件下水解,与金属粉表面产生化学连接,这样可以改善复合材料的界面特性,提高力学性能<sup>[14]</sup>。将金属粉、纸/塑/铝废弃粉料、HDPE、偶联剂(占金属粉质量的1.0%)在开放式炼塑机上160  $^{\circ}\text{C}$ 混炼10 min,所得混合料在100  $^{\circ}\text{C}$ 下干燥24 h以除去水分。其中,金属粉的体积分数为0.5%,10%,15%,20%,纸/塑/铝废弃粉料和HDPE的质量比为1:1。将混合料于170  $^{\circ}\text{C}$ 的平板硫化机上预热15 min后,在8 MPa的压力条件下热压成型。

### 1.3 性能测试

#### 1.3.1 密度测试

按照《人造板及饰面人造板理化性能试验方法》<sup>[15]</sup>测试材料的密度。

#### 1.3.2 力学性能测试

按照《塑料弯曲性能的测定》<sup>[16]</sup>测试材料的弯曲模量和弯曲强度。

#### 1.3.3 24h吸水厚度膨胀率测试

按照《人造板及饰面人造板理化性能试验方法》,测试材料的24 h吸水厚度膨胀率。将试件浸于pH值为7 $\pm$ 1,温度为(20 $\pm$ 2)  $^{\circ}\text{C}$ 的水槽中,试件垂直于水平面并保持水面高于试件上表面,试件下表面与水槽

底部有一定距离,试件之间也有一定间隙,使其可自由膨胀。浸泡24 h后,取出试件,擦去表面附水,在原测量点测其厚度,测量工作在30 min内完成。按式(1)计算出24 h吸水厚度膨胀率 $\eta$ 为:

$$\eta = (h_2 - h_1) / h_1 \times 100\% \quad (1)$$

式中: $\eta$ 为吸水厚度膨胀率; $h_1$ 为浸水前试件厚度; $h_2$ 为浸水后试件厚度。

#### 1.3.4 24 h吸水率

按照《人造板及饰面人造板理化性能试验方法》测试材料的24 h吸水率。将试件浸于pH值为7 $\pm$ 1,温度为(20 $\pm$ 2)  $^{\circ}\text{C}$ 的水槽中,试件垂直于水平面并保持水面高于试件上表面,试件下表面与水槽底部有一定距离,试件之间有一定间隙,使其可自由膨胀。试件浸泡24 h $\pm$ 15 min后,从水中取出并擦去表面附水,在10 min内完成称量。按式(2)计算出24 h吸水率 $W$ :

$$W = (m_2 - m_1) / m_1 \times 100\% \quad (2)$$

式中: $W$ 为试件24 h吸水率; $m_1$ 为试件浸水前的质量; $m_2$ 为试件24 h浸水后的质量。

#### 1.3.5 电磁屏蔽效能测试

按照《材料屏蔽效能的测量方法》<sup>[17]</sup>,采用立式法兰同轴装置连接频谱分析仪测试材料的电磁屏蔽效能。把参考试样装入法兰同轴测试装置中,在9 kHz~1.5 GHz范围内进行测量,并存储此时的传输特性。把负载试样装入测试装置中,测量有负载试样后的传输特性。前后2次传输特性之差即为试样的屏蔽效能。

## 2 结果与讨论

材料的密度、力学性能、24 h吸水厚度膨胀率、24 h吸水率、电磁屏蔽效能值见表1。力学性能测试时,取板材中部大小为50 mm $\times$ 6 mm的试样,重复5次,去除最大值和最小值后取平均值。耐水性测试时,取材料中部大小为50 mm $\times$ 50 mm的致密试样,浸没于蒸馏水中,室温25  $^{\circ}\text{C}$ 下重复2次取平均值。

从表1可以看到利乐废弃物基材在未添加金属粉时的密度为0.87  $\text{g}/\text{m}^3$ ,随着金属粉填充量的逐渐增加,密度也逐渐增加。当金属粉的填充量为最大值20%时,材料的密度分别达到2.23  $\text{g}/\text{m}^3$ (Cu),2.48  $\text{g}/\text{m}^3$ (Ni),2.19  $\text{g}/\text{m}^3$ (Fe)。当金属粉填充量继续增加时,物料的混炼过程进行困难。

表 1 金属粉/利乐废弃物制备电磁屏蔽材料的性能测试结果

Tab.1 Test results of metal particle/tetra pak electromagnetic shielding composites

金属粉种类	体积分数/%	密度 $\rho$ /( $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$ )	弯曲模量 $E$ /MPa	弯曲强度 $\sigma_{\text{fm}}$ /MPa	24 h 吸水厚度膨胀率 $T$ /%	24 h 吸水率 $W$ /%	电磁屏蔽效能最大值 $SE_{\text{max}}$ /dB	电磁屏蔽效能平均值 $SE_{\text{ave}}$ /dB
Cu	0	0.87	1597.07	30.66	2.44	0.42	8.93	2.12
	5	1.16	1648.32	33.63	2.05	0.39	12.15	1.37
	10	1.55	1799.19	35.85	1.76	0.35	10.90	2.06
	15	1.76	1979.55	38.93	1.32	0.34	11.47	1.33
	20	2.23	2531.66	41.73	0.80	0.36	9.43	1.31
Ni	0	0.87	1597.07	30.66	2.44	0.42	8.93	2.12
	5	1.23	1932.18	36.30	2.11	0.35	11.99	1.44
	10	1.67	2015.30	42.18	1.71	0.22	9.18	1.60
	15	1.74	2176.86	45.03	1.55	0.18	10.33	1.26
	20	2.48	2638.97	32.02	1.16	0.16	9.57	1.24
Fe	0	0.87	1597.07	30.66	2.44	0.42	8.93	2.12
	5	1.20	1729.37	32.60	1.89	0.35	12.11	1.40
	10	1.49	2025.82	52.24	1.57	0.27	7.12	1.90
	15	1.64	1723.37	55.25	1.35	0.21	8.95	1.49
	20	2.19	1782.16	36.54	0.99	0.17	7.82	2.00

## 2.1 力学性能分析

图 1 和图 2 为金属粉的填充量对复合材料弯曲模量  $E_f$  和弯曲强度  $\sigma_{\text{fm}}$  的影响。当 Cu 和 Ni 的体积分数逐渐增大时,材料的弯曲模量也逐渐变大,分别从添加前的 1597.07 MPa 增大到体积分数为 20% 时的 2531.66 MPa 和 2638.97 MPa,增加幅度为 58.5% 和 65.2%。Fe/利乐板材的弯曲模量在填充范围内呈现先上升后下降的趋势,在体积分数为 10% 时达到最大值 2025.82 MPa,增加了 26.8%。对比 Cu, Ni, Fe 三者,可以归纳为:在金属粉的体积分数为 0 ~ 10% 时,  $E_{f(\text{Ni})} > E_{f(\text{Fe})} > E_{f(\text{Cu})}$ , 在 10% ~ 20% 时,  $E_{f(\text{Ni})} > E_{f(\text{Cu})} > E_{f(\text{Fe})}$ 。

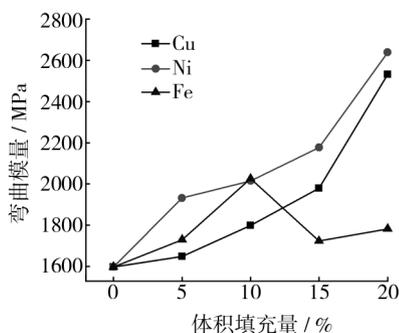


图 1 填充量对弯曲模量的影响

Fig. 1 Effect of volume fraction on flexural modulus

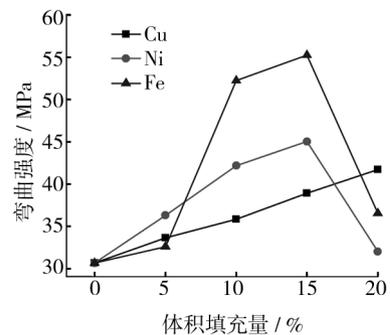


图 2 填充量对弯曲强度的影响

Fig. 2 Effect of volume fraction on flexural strength

Cu/利乐板材的弯曲强度在 0 ~ 20% 的体积范围内,随体积分数的增大而增大。从添加量为 0 时的 30.66 MPa 增加到体积分数为 20% 时的 41.73 MPa,增加幅度为 36.1%。Ni 和 Fe 板材的弯曲强度在 0 ~ 20% 的填充量范围内先上升后下降,其中,在 15% 时达到最大值分别为 45.03 MPa 和 55.25 MPa,增加量为 46.9% 和 80.2%。对比 Cu, Ni, Fe 三者,可以归纳为:在体积分数为 0 ~ 5% 时,  $\sigma_{\text{fm}(\text{Ni})} > \sigma_{\text{fm}(\text{Cu})} > \sigma_{\text{fm}(\text{Fe})}$ ; 在 5% ~ 15% 时,  $\sigma_{\text{fm}(\text{Fe})} > \sigma_{\text{fm}(\text{Ni})} > \sigma_{\text{fm}(\text{Cu})}$ ; 在 15% ~ 20% 时,  $\sigma_{\text{fm}(\text{Cu})} > \sigma_{\text{fm}(\text{Fe})} > \sigma_{\text{fm}(\text{Ni})}$ 。

## 2.2 耐水性能分析

填充量对 24 h 吸水厚度膨胀率和 24 h 吸水率的影响见图 3 和图 4。从图 3 可以看到,随着体积填充量的增加,Cu, Ni, Fe 三者均呈现下降的趋势,且数值区别不大。其中,  $T_{Fe} < T_{Ni}$ ,  $T_{Cu}$  在体积分数小于 10% 时与  $T_{Ni}$  数值相近,在体积分数大于 10% 时明显比  $T_{Ni}$  小,且在体积分数为 20% 的时候达到三者的最小值 0.8%。

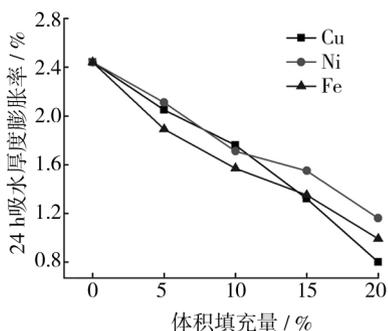


图3 填充量对 24 h 吸水厚度膨胀率的影响

Fig. 3 Effect of volume fraction on thickness swelling rate

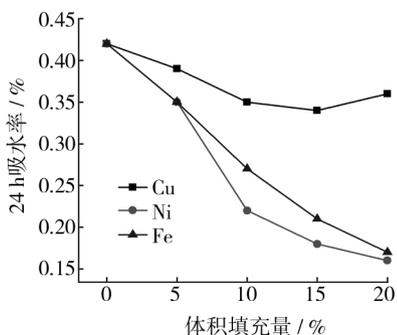


图4 填充量对 24 h 吸水率的影响

Fig. 4 Effect of volume fraction on water absorption rate

由图 4 看出,随着体积分数的增加,24 h 吸水率逐渐减小,但 Cu, Ni, Fe 三者差异较大。利乐板材在未添加金属粉时的 24 h 吸水率为 0.42%,当填充至 20% 时, Ni, Fe, Cu 复合利乐板材的 24 h 吸水率分别为 0.16%, 0.17%, 0.36%。其中, Cu/利乐板材的 24 h 吸水率在体积分数小于 10% 时随填充量的增加而下降,当填充量大于 10% 后,吸水率随填充量的增加基本保持在 0.35% 左右。可见,24 h 吸水率的整体趋势为  $W_{Ni} < W_{Fe} < W_{Cu}$ 。

综上所述,金属粉填充利乐包装废弃复合材料的耐水性为: Ni/利乐 > Fe/利乐 > Cu/利乐。这是由于从

金属的活泼性来看,  $Fe > Cu > Ni$ , 水中含有部分氧气,金属在适当的氧气、湿度条件下易被氧化,而氧化物表面容易吸附水中的羟基,破坏金属粉与利乐基材的界面,导致水分子的渗入,致使吸水率增加。

## 2.3 电磁屏蔽效能分析

金属粉填充量对材料电磁屏蔽效能最大值  $SE_{max}$  和平均值  $SE_{ave}$  的影响见图 5。可以看到,材料在未添加金属粉时仍具有适当的电磁屏蔽效能,  $SE_{max}$  为 8.93 dB,  $SE_{ave}$  为 2.12 dB。这是因为利乐包装废弃物中含有体积分数为 5% 的铝箔,破碎后的铝箔在成型板材中均匀分布,对电磁波起到了一定的反射与吸收作用,因此具有一定的电磁屏蔽效能。随着体积填充量的增大,材料的电磁屏蔽效能并没有显著提升,  $SE_{max-Cu}$ ,  $SE_{max-Ni}$ ,  $SE_{max-Fe}$  分别在 11, 10, 9 dB 上下波动。对比 Cu, Ni, Fe 三者材料,可以明显看出在整个体积填充范围内  $SE_{max-Cu} > SE_{max-Ni} > SE_{max-Fe}$ 。三类材料的电磁屏蔽效能平均值较金属粉添加前没有明显的变化,基本在 2 dB 附近。

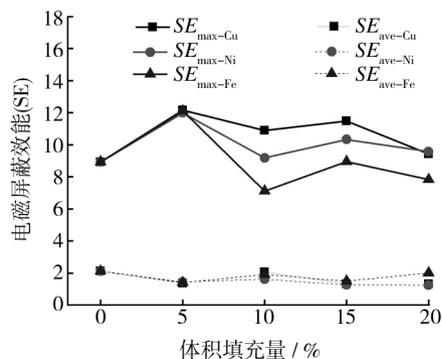


图5 体积填充量对  $SE_{max}$  和  $SE_{ave}$  的影响

Fig. 5 Effect of volume fraction on  $SE_{max}$  and  $SE_{ave}$

综上所述,材料的电磁屏蔽效能排序为:  $SE_{Cu} > SE_{Ni} > SE_{Fe}$ 。填充型电磁屏蔽材料的电磁屏蔽效能很大程度上取决于填充物的电导率  $\sigma$ , 即该物质电阻率  $\rho$  的倒数,电导率越大,电磁屏蔽效能就越好。在温度为 20 °C 时,铜、镍、铁的电导率分别为  $\rho_{Cu} = 1.68 \times 10^{-8} \Omega \cdot m$ ,  $\rho_{Ni} = 6.84 \times 10^{-8} \Omega \cdot m$ ,  $\rho_{Fe} = 9.71 \times 10^{-8} \Omega \cdot m$ , 因此电导率  $\sigma_{Cu} > \sigma_{Ni} > \sigma_{Fe}$ , 这与上面的试验结果相吻合。

至于材料的电磁屏蔽效能比较低的原因,主要归纳为如下 3 点。

1) 金属粉粒径比较小,容易团聚,虽然硅烷偶联剂可以改善颗粒分散情况,但不能完全避免团聚现

象<sup>[18]</sup>。

2) 基材中含有一定量的 HDPE 和 LLDPE, 这些高分子在混炼时将金属粒子包裹起来, 阻止了金属粒子间的相互连接, 不能形成有效的网络连接通路<sup>[19]</sup>, 导致材料的电磁屏蔽效能低下(见图 6)。

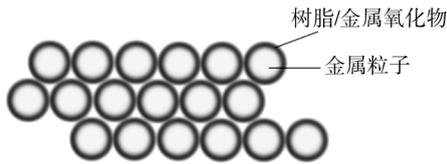


图 6 金属粒子在基体中的存在方式

Fig. 6 Existing way of metal particles in the matrix

3) 金属粒子的相对表面积(表面积与体积的比值)比金属网或金属箔的相对表面积要大得多, 因此表面更容易被氧化, 而金属氧化物一般都不导电, 不导电的金属氧化物包裹了导电的金属粒子<sup>[20]</sup>, 反而降低了材料的电磁屏蔽效能(见图 6)。

### 3 结论

1) 材料的弯曲模量随体积分数的增加基本呈现上升的趋势。在填充量为 0 ~ 10% 时,  $E_{f(Ni)} > E_{f(Fe)} > E_{f(Cu)}$ ; 在填充量为 10% ~ 20% 时,  $E_{f(Ni)} > E_{f(Cu)} > E_{f(Fe)}$ 。

2) 随着金属粉体积分数的增加, 材料的 24 h 吸水厚度膨胀率和 24 h 吸水率均减小。其中, 24 h 吸水率的整体趋势为  $W_{Ni} < W_{Fe} < W_{Cu}$ , 24 h 吸水厚度膨胀率区别不大。由此, 金属粉填充利乐包装废弃复合材料的耐水性为: Ni/利乐 > Fe/利乐 > Cu/利乐。

3) 金属粉填充量的增加并没有显著地提高电磁屏蔽效能, 但对比 Cu, Ni, Fe 3 种材料, 其电磁屏蔽效能排序为:  $SE_{Cu} > SE_{Ni} > SE_{Fe}$ , 这与 3 种金属的电导率有关, 且成正比关系。

4) 导致材料电磁屏蔽效能低下的原因主要是金属粉的团聚、树脂或金属氧化物的包覆作用。

### 参考文献:

[1] 谢明辉, 李丽, 黄泽春, 等. 典型复合包装的全生命周期环境影响评价研究[J]. 中国环境科学, 2009, 29(7): 773-779.

XIE Ming-hui, LI Li, HUANG Ze-chun, et al. Environmental Impact Estimation of Al-PE-Pa Complex Package Using Life Cycle Assessment[J]. China Environmental Science, 2009, 29(7): 773-779.

[2] JORGELINA P, MONTSE M, FRANCESC C. The Carbon Footprint and Energy Consumption of Beverage Packaging Selection and Disposal[J]. Journal of Food Engineering, 2011, 103(4): 357-365.

[3] XIE M H, LI L, QIAO Q, et al. A Comparative Study on Milk Packaging Using Life Cycle Assessment: From PA-PE-Al Laminate and Polyethylene in China[J]. Journal of Cleaner Production, 2011, 19(17/18): 2100-2106.

[4] LOPES C M A, FELISBERTI M I. Composite of Low-density Polyethylene and Aluminum Obtained from the Recycling of Postconsumer Aseptic Packaging[J]. Journal of Applied Polymer Science, 2006, 101(5): 3183-3191.

[5] ATILLA M, AYSE S M, METIN G. Manufacturing Low Density Boards from Waste Cardboards Containing Aluminium[J]. Materials and Design, 2007, 28(7): 2215-2217.

[6] 崔忠伟. 废弃纸基复合包装再生利用技术的探讨[J]. 上海造纸, 2009, 40(3): 62-67.

CUI Zhong-wei. The Research of the Recycling of Liquid Packaging Paper Box[J]. Shanghai Paper Making, 2009, 40(3): 62-67.

[7] 李宁, 熊晓莉. 铝塑纸复合包装的分离研究[J]. 包装工程, 2008, 29(12): 56-58.

LI Ling, XIONG Xiao-li. Study on the Separation of Aluminum-plastic-paper Composite for Packaging[J]. Packaging Engineering, 2008, 29(12): 56-58.

[8] 张冀飞, 闫大海, 黄泽春, 等. 纸基复合包装中铝塑分离的湿法工艺条件研究[J]. 环境科学研究, 2008, 21(6): 99-104.

ZHANG Yi-fei, YAN Da-hai, HUANG Ze-chun, et al. Research on the Wet Process Conditions of the Separation of Aluminum and Plastic in Post-consumer Aseptic Packages[J]. Research of Environmental Sciences, 2008, 21(6): 99-104.

[9] HWANG G S, WANG I C E, SU Y C. Preparation of Composite Board Using Foil-laminated and Plastic-laminated Liquid Packaging Paperboard as Raw Materials[J]. Journal of Wood Science, 2006, 52(3): 230-235.

[10] SELIM S, NADIR A, ZEKI C. Fungicide and Insecticide Properties of Cardboard Panels Made from Used Beverage Carton with Veneer Overlay[J]. African Journal of Agricultural Research, 2010, 5(2): 159-165.

[11] 汪彪, 杨尽. 矿物材料在电磁屏蔽中的应用研究[J]. 广东微量元素科学, 2009, 16(4): 27-31.

- WANG Biao, YANG Jin. Research on Application of Mineral Materials in Shielding Electromagnet[J]. Guangdong Trace Elements Science, 2009, 16(4): 27-31.
- [12] CAO X G, ZHANG H Y. Preparation of Silver-coated Copper Powder and Its Oxidation Resistance Research[J]. Powder Technology, 2012, 226: 53-56.
- [13] GUAN H T, LIU S H, DUAN Y P, et al. Cement Based Electromagnetic Shielding and Absorbing Building Materials [J]. Cement and Concrete Composites, 2006, 28(5): 468-474.
- [14] LU Y X, XUE L L. Electromagnetic Interference Shielding, Mechanical Properties and Water Absorption of Copper/Bamboo Fabric (Cu/BF) Composites[J]. Composites Science and Technology, 2012, 72(7): 828-834.
- [15] GB/T 17657—1999, 人造板及饰面人造板理化性能试验方法[S].  
GB/T 17657—1999, Test Methods of Evaluating the Properties of Wood-based Panels and Surface Decorated Wood-based Panels[S].
- [16] GB/T 9341—2008, 塑料弯曲性能的测定[S].
- GB/T 9341—2008, Plastics Determination of Flexural Properties[S].
- [17] SJ 20524—1995, 材料屏蔽效能的测量方法[S].  
SJ 20524—1995, Measuring Methods for Shielding Effectiveness of Materials[S].
- [18] JALALI M, DAUTERSTEDT S, MICHAUD A, et al. Electromagnetic Shielding of Polymer-matrix Composites with Metallic Nanoparticles [J]. Composites. Part B: Engineering, 2011, 42(6): 1420-1426.
- [19] 林硕, 吴年强, 李志章. 偶联剂对铜系复合涂料导电稳定性的影响[J]. 复合材料学报, 1999, 16(4): 44-49.  
LIN Shuo, WU Nian-qiang, LI Zhi-zhang. Effect of Coupling Agent on Electric Conductivity Stability of Copper-filled Composite Paints [J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 1999, 16(4): 44-49.
- [20] 郭艳辉. 微细铜粉的空气氧化及表面改性研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2008.  
GUO Yan-hui. Study on the Oxidation Behavior of Fine Copper Powder in Air and Its Surface Modification[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2008.

(上接第 36 页)

- [2] 王凤菊, 陈煜, 谭惠民. 壳聚糖季铵盐抗菌剂的研究进展[J]. 化工新型材料, 2011, 39(11): 13-15.  
WANG Feng-ju, CHEN Yu, TAN Hui-min. Research Progress of Quaternary Ammonium Salt Coupled Chitosan Antibacterial[J]. New Chemical Materials, 2011, 39(11): 13-15.
- [3] 张美云, 郭惠萍. 季铵盐壳聚糖的制备及其在抗菌纸中的应用[J]. 中国造纸, 2008, 27(2): 14-17.  
ZHANG Mei-yun, GUO Hui-ping. Preparation of Quaternary Ammonium Salt of Chitosan and Its Application in Antibacterial Paper[J]. China Pulp & Paper, 2008, 27(2): 14-17.
- [4] 陈佩蓉, 屈维均, 何福望. 制浆造纸实验[M]. 北京: 中国轻工业出版社, 1990.  
CHEN Pei-rong, QU Wei-jun, HE Fu-wang. The Experiment of Pulping and Papermaking[M]. Beijing: China Light Industry Press, 1990.
- [5] 汤建新, 邓靖, 李文, 等. 纸质基材抗菌包装及性能研究[J]. 湖南工业大学学报, 2011, 25(5): 6-8.  
TANG Jian-xin, DENG Jing, LI Wen, et al. Research on Pa-
- per Substrate Antimicrobial Package and Its Performance [J]. Journal of Hunan University of Technology, 2011, 25(5): 6-8.
- [6] 钟泽辉, 李婷. 载银沸石的制备及其在牛皮纸上的应用研究[J]. 包装工程, 2012, 33(1): 49-53.  
ZHONG Ze-hui, LI Ting. Research on Preparation of Silver-loaded Zeolite and Its Application on Kraft Paper[J]. Packaging Engineering, 2012, 33(1): 49-53.
- [7] 崔健梅, 刘忠, 朱西赏. 季铵盐壳聚糖的制备以及在纸张中的应用[J]. 天津造纸, 2010(2): 27-30.  
CUI Jian-mei, LIU Zhong, ZHU Xi-shang. Preparation of Quaternary Ammonium Salt of Chitosan and Its Application in the Paper[J]. Tianjin Paper Making, 2010(2): 27-30.
- [8] 杨东芝, 刘晓菲, 管云林, 等. 壳聚糖抗菌活性的影响因素[J]. 应用化学, 2000, 17(6): 558-561.  
YANG Dong-zhi, LIU Xiao-fei, GUAN Yun-lin, et al. The Influence Factors of Chitosan Antibacterial Activity [J]. Chinese Journal of Applied Chemistry, 2000, 17(6): 558-561.