

## 西南桦木包装材料在热处理后的润湿性能研究

高伟<sup>1,2</sup>, 罗建举<sup>1,2</sup>, 李荣册<sup>1</sup>, 石世亨<sup>1</sup>, 郭玺<sup>1</sup>, 卢佩<sup>1</sup>

(1. 广西大学, 南宁 530004; 2. 广西壮族自治区木材及木制品质量监督检验站, 南宁 530004)

**摘要:** 通过动态接触角测量、红外光谱分析、表面粗糙度测量、扫描电镜观察和偏相关分析, 研究了西南桦木的润湿性能。结果表明, 木材经 180 °C 热处理 4 h 后, 润湿性能下降; 接触角由 40° 增至 121°, 羟基和羰基数量减少, 粗糙度降低; 处理时间与接触角显著相关; 西南桦木用作包装材料, 若采用热处理, 可去除有害生物, 还具备疏水功能。

**关键词:** 西南桦木; 木质包装材料; 热处理; 润湿性; 接触角

**中图分类号:** TB484. 2; TB487 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3563(2013)13-0066-05

## Wettability of *Betula Alnoides* Packaging Materials after Heat Treatment

GAO Wei<sup>1,2</sup>, LUO Jian-ju<sup>1,2</sup>, LI Rong-ce<sup>1</sup>, SHI Shi-heng<sup>1</sup>, GUO Xi<sup>1</sup>, LU Pei<sup>1</sup>

(1. Guangxi University, Nanning 530004, China; 2. Guangxi Wood and Wood Products Quality Supervision and Test Station, Nanning 530004, China)

**Abstract:** The wettability of *Betula alnoides* was studied through dynamic contact angle measurement, Fourier transform infrared spectroscopy analysis, surface roughness measurement, scanning electron microscope observation and partial correlation analysis. The results showed that the wettability of *Betula alnoides* degrades after heat-treatment at 180 °C for 4 h since contact angle increases from 40 to 121 degree, the amount of hydroxyl and carbonyl reduce, and surface roughness decrease; heat-treatment has significant correlation with contact angle; heat treatment of *Betula alnoides* not only can remove harmful organisms, but also possesses hydrophobic function.

**Key words:** *Betula alnoides*; wood packaging material; heat treatment; wettability; contact angle

西南桦木是桦木科桦木属木材, 不翘曲、不开裂、干缩比小、不易变形, 并且色泽柔和、花纹美观, 常用在高档家具、建筑、军工、胶合板等领域, 在木质包装材料中应用也日益广泛。据国际植物保护公约组织公布的《国际贸易中的木质包装材料管理准则》要求, 货物使用的木质包装材料应在出境前进行除害处理, 以防止林木有害生物随货物使用的木质包装材料在国际间传播蔓延<sup>[1]</sup>。目前采用的除害处理主要有熏蒸、热处理、药剂喷洒法、辐射和微波处理法等<sup>[2]</sup>。

国际上对桦木属木材的热处理研究非常活跃。将白桦(*Betula papyrifera*)木材经不同温度热处理后, 扫描电镜(SEM)发现细胞壁变化较大, 傅里叶变换红外光谱分析(FTIR)发现木质素成分在人工风化过程中, 非晶体纤维素和高度结晶纤维素消失, 保护热处

理后白桦木材由于风干而发生降解<sup>[3]</sup>。桦木(*Betula* spp.)经 135 ~ 600 °C 处理后, 通过液相色谱分析发现, 羰基化合物中有甲醛、乙醛、2-糠醛和丙醛<sup>[4]</sup>。银桦(*Grevillea robusta*)心材天然耐久性低, 在惰性气体保护下热处理, 提高了耐腐蚀性。经过 FTIR 和核磁共振分析研究发现, 热处理后木材微观发生改变, 抗真菌和白蚁性能增加<sup>[5]</sup>。垂枝桦(*Betula pendula*)和欧洲白桦(*Betula pubescens*)木材在高温干燥下, 颜色明显加深<sup>[6]</sup>, 欧洲白桦经计算机 X 射线断层扫描毛细管吸水发现其吸水性降低<sup>[7]</sup>。白桦木(*Betula* spp.)热处理后的静曲强度呈上升趋势, 同比云杉、松木、杉木、杨木下降的趋势有所不同<sup>[8]</sup>, 木材的抗真菌性得到显著改善<sup>[9]</sup>。粉桦(*Betula platyphylla* Suk.)热处理后的尺寸稳定性和弹性模量提高, 但处理后的润湿性

收稿日期: 2013-01-19

基金项目: 广西大学科研基金资助项目(XJZ120270); 2011年度广西教育厅科研立项项目(桂教科研[2011]第14号)

作者简介: 高伟(1981-), 男, 河南人, 硕士, 广西大学讲师, 主要从事木质包装材料改性应用的教学与研究。

下降,木材的抗弯强度降低<sup>[10]</sup>。除锯材改性外,还可以将木质纤维热处理后制成复合材料。如赤桉(*Eucalyptus camaldulensis*)木纤维热处理后,再热压木塑复合材料(WPC),可以提高尺寸稳定性等问题<sup>[11]</sup>,可以有效避免吸潮作用在加速老化试验中引起的WPC力学性能的降低<sup>[12]</sup>。也可以制造托盘等新兴生态环境材料的木塑复合材料<sup>[13]</sup>,具有易回收、易降解、平整、防水、无须熏蒸、造价低、环保等优点<sup>[14]</sup>,市场前景非常广阔<sup>[15]</sup>。不只是赤桉木材具备这个特性,桦木也可以借鉴加工复合材料。

西南桦木作为我国近来重要的家具和包装用材,在热处理方面的研究相对较少。笔者以西南桦木润湿性为切入点,研究热处理表面接触角。吸附理论认为,接触角越小,浸润效果越好<sup>[18]</sup>,若西南桦木用作包装材料未经涂饰,则希望润湿性差一些,即接触角更大。为此还需要同时考察化学成分的变化对接触角、表面粗糙程度的影响,综合分析热处理过程中影响润湿性能的因素。

## 1 实验

### 1.1 试材与制样

试材采自中国林业科学研究院热带林业实验中心白云实验场(广西壮族自治区凭祥市)。带锯机制材,长2000 mm、厚25 mm,自然宽。含水率干燥至12%。加工试验所需要的试样,动态接触角和表面粗糙度试样规格为:长120 mm、宽30 mm、厚3 mm,截取小样前双面砂光。FTIR分析和SEM观察使用试样规格为:长100 mm、宽5 mm、厚5 mm,锯解为小样前双面砂光。

### 1.2 仪器

热处理箱(上海实验仪器厂,101A-3);动态接触角测量仪(德国KRUSS设备公司,DSA100);傅里叶变换红外光谱仪(美国赛默飞世尔科技公司,Nicolet 6700);便携表面粗糙度测定仪(日本株式会社东京精密,HANDYSURF E-35B);扫描电镜(日本日立公司,S-3400N)。

### 1.3 方法

1) 西南桦木试样热处理。将试样置入热处理箱中,不间断地按下面步骤操作:75℃条件下加热3 h使木材内外受热均匀;103℃条件下加热20 h使木材接近绝干;180℃条件下热处理至设定时间(1,2,4

h),在140℃以上时通往水蒸气保护;达到热处理时间后,停止加热,待箱内温度降至45℃时打开箱门取出试样。

2) 试样调制。所有试样在恒温恒湿(20℃,65%)环境中调制14 d,放置时上下表面悬空,均与大气接触。

3) 表面动态接触角测试。在恒温恒湿(20℃,65%)环境中测量表面动态接触角,介质为蒸馏水,每个处理水平测量6个试样,每个试样重复测量3次以上。液滴脱落针尖计时为0,每80 ms读取一次液滴左右接触角平均值,测试至18 s,共测试226个点。微量泵注射量参照水在铝合金表面的接触角测量中使用的5 μL<sup>[17]</sup>,由于材料不同,本试验每次注射液滴3 μL。使用Origin绘制4个处理条件下的四屏图。

4) 表面粗糙度测量。表面粗糙度所用试样与动态接触角试样同批,以便求证粗糙度与接触角的关系。动态接触角测量完毕后,立即使用吸水纸将液滴吸干,并置于恒温恒湿(20℃,65%)环境中自然干燥7 d,然后对每个试样进行测量,每个试样重复5次,求出每个试样的平均值和同处理水平下的平均值,通过SPSS软件计算粗糙度与接触角、处理时间3要素之间的偏相关(即净相关)系数。

5) 表面粉末的FTIR分析。在试样表面刮取粉末,与无水溴化钾按1:150的比例混合压片,对试样进行红外光谱扫描。扫描范围为4000~400 cm<sup>-1</sup>,光谱分辨率为4 cm<sup>-1</sup>,扫描次数为32次。使用Origin软件对吸收度和波数进行绘图。重点观测亲水集团(羟基和羰基)的变化。

6) 表面层的SEM观察。用双面刀在试样表面截取长约5 mm、宽约2.5 mm、厚约0.1 mm的小木片,喷金处理后在扫描电镜下观察表面形貌,验证偏相关分析结果。

## 2 结果与分析

### 2.1 表面动态接触角分析

动态接触角平均值见表1,变化曲线见图1。图中每条曲线代表一个点的变化。可以明显看出,未处理材料表面是亲水的,当蒸馏水滴至木材表面,接触角一直下降,18 s后平均值在40°以下且仍有下降趋势,与初始值相比,平均下降约53°。而处理材在1 s内曲线骤然下降然后趋于平缓,随着处理时间的延

表1 接触角平均值

Tab.1 Average value of contact angle

处理条件	初始接触角	初始接触角	18 s时接触角	18 s时接触角
	均值/(°)	标准差	均值/(°)	标准差
未处理	92.47	13.95	39.53	8.94
处理1 h	130.43	7.56	116.79	13.61
处理2 h	120.41	6.85	108.16	7.69
处理4 h	129.13	5.58	121.22	5.42

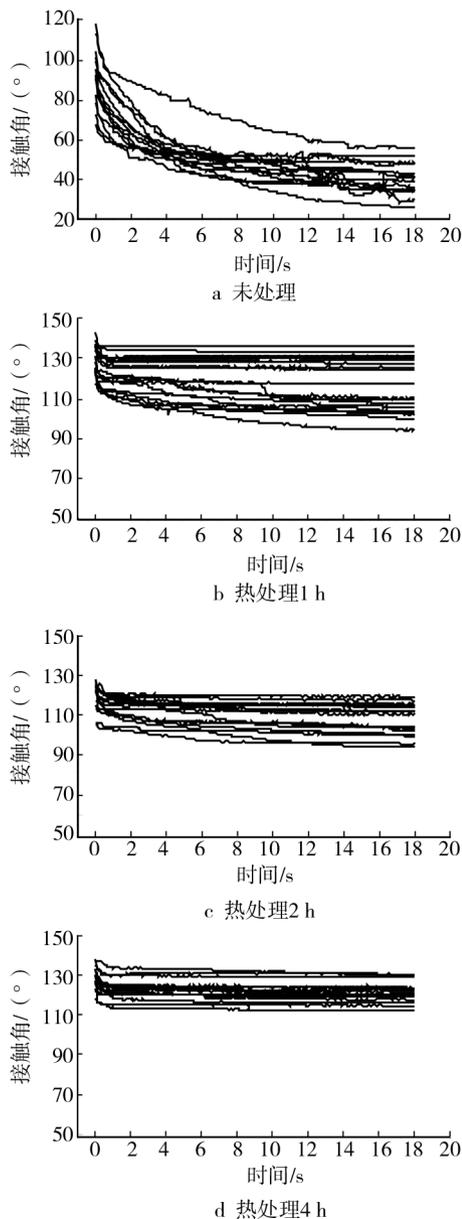


图1 动态接触角变化曲线

Fig.1 Changing curves of dynamic contact angle

长,2 h和4 h处理材的动态接触角曲线变得更加平稳、分布范围更加集中。处理1 h后,有11条曲线在1 s后变平缓,有8条仍缓缓下降,18 s时的接触角平

均值约为 $117^\circ$ ,比初始值平均降低约 $14^\circ$ 。处理2 h后,有14条曲线在1 s后不再有明显变化,有4条曲线在2~8 s内略为下降,8 s后下降趋势不再明显,18 s时平均值约 $108^\circ$ ,比初始值平均降低 $12^\circ$ 。处理4 h后所有曲线接近于平行线,部分曲线重叠在一起,在图中呈“窄带”分布,标准差更小,18 s时的平均值为 $121^\circ$ ,为最高值,平均降幅最小约 $8^\circ$ 。说明处理时间的延长,可以使西南桦木表面更加疏水,蒸馏水在上面难以流平。

## 2.2 表面粉末的 FTIR 分析

FTIR 分析谱分见图2。可以看出, $3462.01\text{ cm}^{-1}$

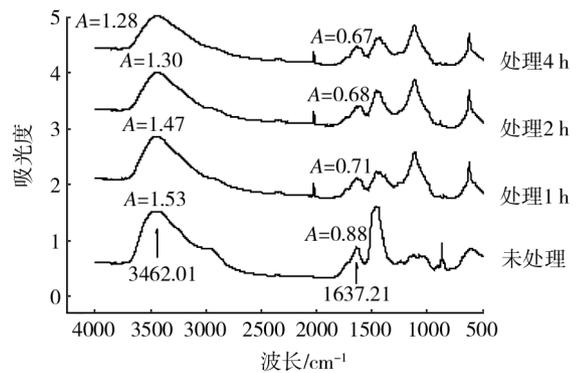


图2 FTIR 谱图分析

Fig.2 FTIR spectrum analysis

处出现羟基吸收峰,未处理材的吸光度为1.53,随着处理时间的延长,吸光度从1.47降低到1.28,下降幅度明显。在波数 $1637.21\text{ cm}^{-1}$ 处出现羰基吸收峰,吸光度为0.88,热处理1 h后,吸光度明显下降至0.71,处理2 h和4 h后,吸光度分别为0.68和0.67,略有下降趋势。羟基和羰基是亲水集团,其数量的减少,是西南桦木表面疏水的原因之一。

## 2.3 表面粗糙度分析

表面粗糙度平均值见图3。处理1 h后,粗糙度

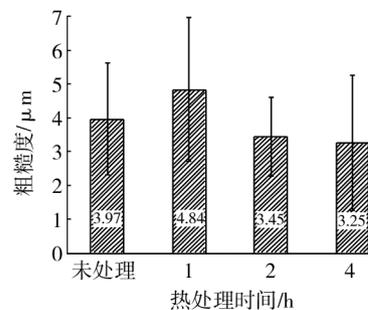


图3 表面粗糙度平均值

Fig.3 Average value of surface roughness

提高,即表面更加不平整,高于未处理材,随着处理时间的延长,表面又趋于光滑。热处理过程中,纤维会有断开等情况,所以处理 1 h 后粗糙度会增加;随着进一步的处理,表面有轻微的化学反应和纤维的软化,使表层逐渐光滑。

表 2 偏相关分析

Tab. 2 Results of partial correlation analysis

变量关系	零阶相关		一阶相关			
	相关性	显著性(双侧)	自由度	相关性	显著性(双侧)	自由度
处理时间与接触角	0.656	0.001	20	0.698	0.000	19
处理时间与粗糙度	-0.247	0.269	20	-0.394	0.077	19
接触角与粗糙度	0.076	0.736	20	0.326	0.150	19

理时间对粗糙度的零阶偏相关系数是-0.247,为低相关;净相关系数为-0.394,为中等相关,即处理时间延长,粗糙度略有降低的趋势。三因素中,接触角与粗糙度的相关性极差,可以认为不相关;但是有时间因素的影响,造成了分析假象,其净相关系数为0.326,二者中等相关,即粗糙度下降接触角有轻微的增加趋势。

## 2.4 SEM 分析

试样在扫描电镜下的形貌见图 4。由图 4 可以明

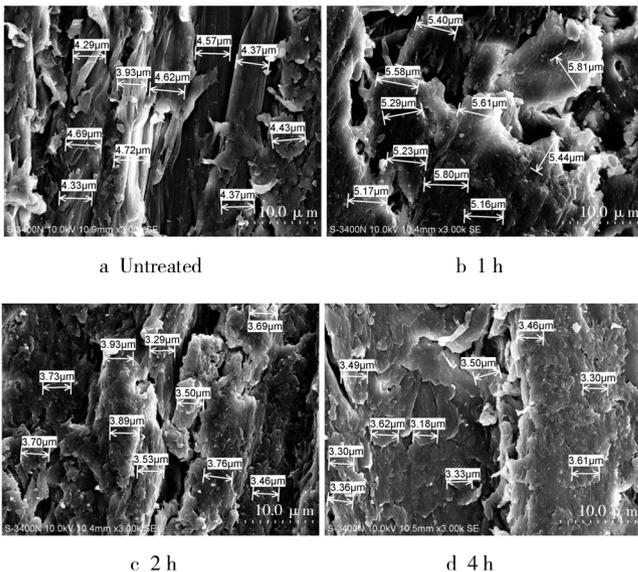


图 4 试样放大 3000 倍时的 SEM 形貌特征

Fig. 4 Morphology characteristics of samples at 3000 times magnification by SEM

显看到,未处理材表面纤维排列有序,处理材在高温侵蚀下表面结块,并随着时间延长,结块变得小而多。未处理材纤维直径测量平均值为  $4.432 \mu\text{m}$ ,标准偏

通过 SPSS 软件对处理时间、表面粗糙度和接触角进行偏相关分析,结果见表 2。可以看出,处理时间与接触角相关性显著,相关系数为 0.656;在去除表面粗糙度因素的影响后,净相关系数为 0.698。由此可见,接触角是随着处理时间延长而显著增加的。处

差为 0.234。高温热处理 1 h 结块平均尺寸为  $5.449 \mu\text{m}$ ,标准偏差为 0.244;处理 2 h 后结块平均尺寸降低至  $3.648 \mu\text{m}$ ,标准偏差为 0.200;处理 4 h 后结块平均尺寸降至  $3.415 \mu\text{m}$ ,标准偏差为 0.144。

将 4 种处理条件下的形貌结块平均宽径与粗糙度变化结果平均值,通过 SPSS 求其相关性可得,二者 Pearson 相关性系数为 0.998,双侧显著性水平为 0.002,在 0.01 水平(双侧)上显著相关。说明热处理使西南桦木表面的形貌发生了变化,由纤维块变化成结块状,随着温度的升高出现块的分裂、变小等现象,从而使粗糙度降低。

处理 4 h 后,不但结块尺寸减少,同时还附着大量小颗粒,其直径约为  $0.322 \mu\text{m}$ (见图 5,测量 20 次,

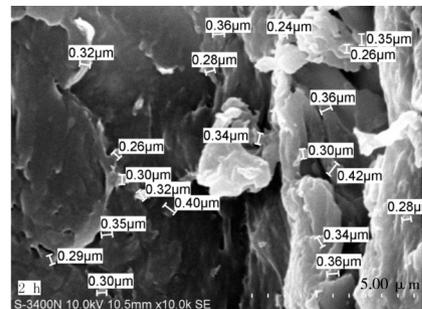


图 5 热处理 4 h 时试样在 10000 倍下的形貌

Fig. 5 Surface features of samples after 4 h heat treatment at 10000 times magnification

标准偏差为 0.047)。处理 4 h 的试样表面与蒸馏水接触 18 s 后,液滴在试样上的面积约为  $4.52 \text{ mm}^2$ ,其直径约为  $2.40 \text{ mm}$ ,是图 5 所示结块结构的 7500 倍左右,这样使蒸馏水与结块接触后,使蒸馏水悬浮于结块上方,降低了处理材表面的润湿性。

### 3 结论

西南桦木热处理后表面润湿性能变差,疏水性能增强,蒸馏水在上面难以流平,处理 4 h 后,接触角为 121°,与处理时间相关性显著。热处理后,羟基和羧基等亲水官能团含量降低,随着热处理时间的延长,表面粗糙度降低。未处理的表面形貌纤维是有序排列的,处理 1 h 后出现块状结构,随着处理时间的延长,结块变得更小,结构趋于规整。块状结构尺寸与粗糙度测量值显著相关。处理 4 h 的表面还有大量小颗粒,也是西南桦木表面疏水的原因。西南桦木经热处理后用于包装材料,不仅能够清除有害生物,还可以改变力学性能和表面润湿性能,在未涂料等情况下具有疏水功能,降低了水分与木材的反应,增加了包装材料的耐腐蚀性能。

#### 参考文献:

- [1] 张方文,于文吉,哈密提,等. 入境木质包装材料检疫除害处理现状与分析[J]. 包装工程,2007,28(10):20-23.  
ZHANG Fang-wen, YU Wen-ji, HA Mi-ti, et al. Current Status and Analysis of the Entry Quarantine Treatments of Wood Packaging Materials [J]. Packaging Engineering, 2007, 28(10):20-23.
- [2] 张方文,于文吉. 木质包装材料的发展现状和前景展望[J]. 包装工程,2007,28(2):27-30.  
ZHANG Fang-wen, YU Wen-ji. Current Status and Development of Wood-based Packaging Materials [J]. Packaging Engineering, 2007, 28(2):27-30.
- [3] HUANG X, KOCAEFE D, KOCAEFE Y, et al. Structural Analysis of Heat-treated Birch (Betula Papyrifera) Surface during Artificial Weathering[J]. Applied Surface Science, 2013, 264:117-127.
- [4] VELKOVA V, KACIKOVA D, MARTINKA J, et al. Determination of Carbonyl Compounds at Thermal Loading of Wood. In 11th International Multidisciplinary Scientific Geoconference, 2011:1207-1212.
- [5] MBURU F, DUMARCAY S, HUBER F, et al. Evaluation of Thermally Modified Grevillea Robusta Heartwood as an Alternative to Shortage of Wood Resource in Kenya: Characterisation of Physicochemical Properties and Improvement of Bio-resistance[J]. Bioresource Technology, 2007, 98(18):3478-3486.
- [6] MOTTONEN V, KARKI T. Color Changes of Birch Wood during High-temperature Drying [J]. Drying Technology, 2008, 26(9):1125-1128.
- [7] SEHLSTEDT-PERSSON M, JOHANSSON D, MOREN T. Effect of Heat Treatment on The Microstructure of Pine, Spruce and Birch and The Influence on Capillary Absorption[M]. 2006.
- [8] SHI J L, KOCAEFE D, ZHANG J. Mechanical Behaviour of Quebec Wood Species Heat-treated Using Thermo Wood Process[J]. Holz Als Roh-Und Werkstoff, 2007, 65(4):255-259.
- [9] KOCAEFE D, SHI J L, YANG D Q, et al. Preliminary Study of Thermal Treatment Effects on Mold Growth of Selected Quebec Wood Species [J]. Forest Products Journal, 2007, 57(12):30-33.
- [10] SUN J, WANG X, WANG X, et al. Physical and Mechanical Properties of Five Heat-treated Hardwood Species [A]. Edited by Chen WZ, Xu XP, Dai PQ, et al. In Advanced Manufacturing Technology, Pts 1-4. Volume 472-475 [C]. Advanced Materials Research, 2012:1132-1134.
- [11] AYRILMIS N, JARUSOMBUTI S, FUEANGVIVAT V, et al. Effect of Thermal-treatment of Wood Fibres on Properties of Flat-pressed Wood Plastic Composites [J]. Polymer Degradation and Stability, 2011, 96(5):818-822.
- [12] 石光,秦炜,林少全,等. 木塑复合材料老化性能研究进展[J]. 包装工程,2009,30(1):120-123.  
SHI Guang, QIN Wei, LIN Shao-quan, et al. Research Progresses of Aging Performance of Wood-plastic Composites [J]. Packaging Engineering, 2009, 30(1):120-123.
- [13] 石光,秦炜,林少全,等. 木塑复合材料老化实验方法及表征[J]. 包装工程,2009,30(10):14-17.  
SHI Guang, QIN Wei, LIN Shao-quan, et al. Weathering Test Methods and Characterization of Wood-plastic Composites [J]. Packaging Engineering, 2009, 30(10):14-17.
- [14] 李志强,刘乘,李国志. 新型木屑复合托盘性能试验研究[J]. 包装工程,2009,30(6):42-43.  
LI Zhi-qiang, LIU Cheng, LI Guo-zhi. Testing and Research on the Performance of New Sawdust Composite Pallet [J]. Packaging Engineering, 2009, 30(6):42-43.
- [15] 邓巧云,沈辰栋,朱燕玲,等. 塑料托盘的成型工艺及市场前景[J]. 包装工程,2010,31(19):117-120.  
DENG Qiao-yun, SHEN Chen-dong, ZHU Yan-ling, et al. Forming Technology and Market Prospect of Plastic Pallet [J]. Packaging Engineering, 2010, 31(19):117-120.
- [16] 李小龙,张凤琴,何农跃,等. 不同预处理方法对稻草纤维性能的影响[J]. 包装工程,2010,31(1):7-9.

### 3 结论

1) 采用次磷酸钠液相还原硝酸银溶液制备纳米银分散液时,还原剂次磷酸钠的用量,反应温度及分散剂的用量对反应过程影响较大,通过精确控制分散剂的添加量,可以提高导电填料的稳定性,避免絮凝现象的产生。

2) 通过对各组分的研究,得出了制备纳米银分散液的最佳工艺条件:在  $n(\text{NaH}_2\text{PO}_2 \cdot \text{H}_2\text{O})/n(\text{AgNO}_3)$  为 2.5 : 1,  $n(\text{PVP})/n(\text{AgNO}_3)$  为 1.5 : 1,  $n(\text{六偏磷酸钠})/n(\text{AgNO}_3)$  为 0.007 : 1, 反应温度为 40 °C 条件下,可制得粒度分布在 15 ~ 60 nm 的纳米银分散液。

#### 参考文献:

- [1] 唐宝玲,陈广学,陈奇峰,等. 纳米银导电油墨的研制[J]. 中国印刷与包装研究,2010(2):358-361.  
TANG Bao-lin, CHEN Guang-xue, CHEN Qi-feng. Research and Manufacture of Nano-silver Conductive Ink [J]. China Printing and Packaging Study, 2010(3):358-361.
- [2] 纪丽娜,唐晓峰,杨振国. 喷墨印制 PCB 用新型纳米银导电油墨的研发现状及趋势[J]. 印制电路信息,2009(6):26-30.  
JI Li-na, TANG Xiao-feng, YANG Zhen-guo. Research and Development Trends of Nano Silver Conductive Ink for Ink-jet Printing of PCB [J]. Printed Circuit Information, 2009(6):26-30.
- [3] 辛秀兰,魏亚娜. 水性油墨的研究进展[J]. 中国印刷与包装研究,2011,3(3):1-8.  
XING Xiu-lan, WEI Ya-na. Research Progress of Water-based Ink [J]. China Printing and Packaging Study, 2011, 3(3):1-8.
- [4] 颜梅. 新型水性油墨的研究[D]. 西安:西安理工大学,2006.  
YAN Mei. Study on Novel Water-Based Ink [D]. Xi'an: Xi'an University of Technology, 2006.
- [5] LEE Kwi-jong, JUN Byung-Ho, LEE Yong-I, et al. Metal-nanoparticles and Method for Producing the Same: US, 20070018140 [P]. 2007-05-20.
- [6] BAKER C, PRADHAN A, PAKSTIS L, et al. Synthesis and Antibacterial Properties of Silver Nanoparticles [J]. J Nanosci Nanotechnol, 2005, 5(2):244.
- [7] MERILAMPI S, LAINE-MA T, RUUSKANEN P. The Characterization of Electrically Conductive Silver Ink Patterns on Flexible Substrates [J]. Microelectronics Reliability, 2009, 49(7):782-790.
- [8] 孙红刚. 次磷酸钠液相化学还原法制备纳米银粉的研究[D]. 成都:四川大学,2005.  
SUN Hong-gang. Study on the Preparation of Silver Nanoparticles by Chemical Reduction Using Sodium Hypophosphite in Solution [D]. Chengdu: Sichuan University, 2005.
- [9] 李芝华,王炎伟,于倩倩. 正交设计优化纳米银粉制备的研究[J]. 稀有金属材料与工程,2009,38(2):327-330.  
LI Zhi-hua, WANG Yan-wei, YU Qian-qian. Synthesis of Nanosized Silver Powder by Orthogonal Design [J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2009, 38(2):327-330.
- [10] LI Xiao-long, ZHANG Feng-qin, HE Nong-yue, et al. Effects of Different Pretreatment Methods on Performance of Rice Straw Fiber [J]. Packaging Engineering, 2010, 31(1):7-9.
- [11] 罗雨婷,刘源,黄子发,等. 铝合金超疏水表面的制备和包装应用探讨[J]. 包装工程,2012,33(7):36-39.  
LUO Yu-ting, LIU Yuan, HUANG Zi-fa, et al. Preparation of Super Hydrophobic Aluminum Alloy Surface and Its Application in Packaging [J]. Packaging Engineering, 2012, 33(7):36-39.
- [12] LI Min-rui, ZHENG Zhen, LIU Shu-juan, et al. Polyurethane (Urea)/Polyacrylates Interpenetrating Polymer Network (IPN) Adhesives for Low Surface Energy Materials [J]. Polym Adv Technol, 2011.
- [13] 傅和青,黄洪,张心亚,等. 聚氨酯-环氧树脂-丙烯酸酯杂合分散体的合成[J]. 化工学报,2007,58(2):495-499.  
FU He-qing, HUANG Hong, ZHANG Xin-ya, et al. Preparation of Epoxide-Acrylate-Polyurethane Hybrid Dispersions [J]. Journal of Chemical Industry and Engineering, 2007, 58(2):495-499.
- [14] LI Min-rui, ZHENG Zhen, LIU Shu-juan, et al. Synthesis and Properties of Poly (Acrylates-Co-Urethane) Adhesives for Low Surface Energy Materials [J]. International Journal of Adhesion & Adhesives, 2011(31):565-570.
- [15] 傅和青,黄洪,张心亚,等. 聚氨酯-环氧树脂-丙烯酸酯杂合分散体的合成[J]. 化工学报,2007,58(2):495-499.  
FU He-qing, HUANG Hong, ZHANG Xin-ya, et al. Preparation of Epoxide-Acrylate-Polyurethane Hybrid Dispersions [J]. Journal of Chemical Industry and Engineering, 2007, 58(2):495-499.
- [16] LI Min-rui, ZHENG Zhen, LIU Shu-juan, et al. Polyurethane

(上接第 70 页)

(上接第 76 页)