

## 热压过程中毛竹材加工剩余物蒸爆纤维木质素结构变化规律

尚娜娜, 叶 晓, 黄丽霜, 金贞福

(浙江农林大学 工程学院, 浙江 临安 311300)

**摘要:** 采用红外吸收光谱法、热分析法探讨在热压过程中毛竹 *Phyllostachys edulis* 材加工剩余物蒸爆纤维木质素 (SEBPL) 结构变化规律, 为确定热压工艺及研究无胶黏结机制提供理论依据。①竹材加工剩余物蒸爆纤维木质素高于竹粉磨木木质素 (MBL)。竹无胶纤维板木质素 (SEBBL) 低于 SEBPL, 表明部分低分子量的木质素在热压过程中形成木质素-木质素聚合物或木质素-多糖复合物 (LCC)。②SEBPL 保留了木质素芳香环的结构特征, 但蒸爆过程中木质素侧链的酯键、醚键断裂, 形成游离的酚羟基, 使蒸爆纤维木质素游离酚羟基含量增加。③SEBBL 分别在 115 °C 和 200 °C 附近有 2 个玻璃态转化的吸热峰。在 200 °C 吸热峰可能源于在热压过程形成的木质素-木质素聚合物或木质素-多糖复合物。④蒸爆处理时间长, 竹无胶纤维板的静曲强度和弹性模量降低, 而内结合强度有所提高。竹材加工剩余物蒸爆纤维制备的无胶纤维板具有良好的尺寸稳定性。图 5 表 1 参 15

**关键词:** 林业工程; 竹材加工剩余物; 蒸爆处理; 无胶纤维板; 红外光谱法; 热分析法

**中图分类号:** S759.8; TQ351.0      **文献标志码:** A      **文章编号:** 2095-0756(2012)03-0420-06

## Lignin characteristics of steam exploded bamboo residue during hot pressing

SHANG Na-na, YE Xiao, HUANG Li-shuang, JIN Zhen-fu

(School of Engineering, Zhejiang A & F University, Lin'an 311300, Zhejiang, China)

**Abstract:** bamboo (*Phyllostachys edulis*) residue was subjected to steam explosion treatment to produce superior fibers for binderless boards. Then, lignin was isolated from extract-free bamboo meal, steam exploded pulp, and binderless boards with characteristics being determined by thermo-gravimetry (TG), differential scanning calorimetry (DSC), and fourier transform infrared spectroscopy (FTIR). Results showed that (1) yields of lignin directly extracted with dioxane-water from steam exploded bamboo pulp (SEBPL) and binderless board (SEBBL) were higher than that of milled bamboo lignin (MBL). Also, yield of sebbbl was lower than SEBPL. (2) FTIR results showed cleavage of ester and ether bonds between lignin and p-coumaric acid during steam explosion treatment. (3) SEBBL showed two glass transitions at 115 °C and 200 °C, while MBL gave one glass transitions at 155 °C. (4) the modulus of rupture (MOR) and modulus of elasticity (MOE) decreased with an increase in steaming time; whereas internal bonding (IB) increased. In all cases the dimensional stability of boards did not exceed the maximum requirements for type GB/T 11718-1999. [Ch, 5 fig. 1 tab. 15 ref.]

**Key words:** forest engineering; bamboo residue; steam explosion treatment; binderless board; fourier transform infrared spectroscopy (FTIR); thermo-gravimetry (TG)/differential scanning calorimetry (DSC)

蒸爆制板技术的基础是爆破法 (steam explosion process) 制浆。爆破法制浆是将纤维原料放在高压密闭容器中, 用高温高压和水蒸气进行短时间热处理, 使木质素软化, 横向强度减弱, 柔软可塑, 之后突然减压, 使原料突然膨胀, 产生“爆破”效果, 部分木素剥离, 原料分离成棉絮状纤维<sup>[1]</sup>。填充在胞间层

收稿日期: 2011-08-22; 修回日期: 2011-12-02

基金项目: 国家林业局引进国际先进农业科学技术计划 (“948”计划) 项目 (2011-4-09)

作者简介: 尚娜娜, 从事生物质综合利用研究。E-mail: shangnana511@163.com。通信作者: 金贞福, 教授, 博士, 从事生物质化学转化利用研究。E-mail: Jinzhenfu@yahoo.com.cn

或细胞壁微纤丝之间的木质素裸露到纤维表面是蒸爆法的重要特征，其他制浆法，如热磨法、机械磨浆等均无法实现这一效果。Suzuki 等<sup>[2]</sup>研究结果表明：蒸爆纤维表面颗粒状物是木质素且易被木质素溶剂二氧六环水溶液提取。将蒸爆纤维用二氧六环水溶液处理，得到的木质素得率高于 Björkman 法分离的木质素<sup>[3]</sup>。木质素是无定型的热塑性高聚物，具有玻璃态转化(glass transition)性质，在玻璃态转化温度以下，木质素呈玻璃固态，在玻璃态转化温度以上，木质素软化变黏，并具有胶黏力<sup>[4]</sup>。木质素的玻璃态转化转变特性是木材加工的重要性质。绝干木质素的玻璃态转化温度一般为 127~193 ℃，随树种、分离方法和分子量而异<sup>[5]</sup>。水分对木质素的软化具有显著的影响，木质素吸收水分后，其软化温度明显降低<sup>[4,6]</sup>。无胶纤维板的性能很大程度上依赖于木质素的热可塑性，热压温度高于木质素玻璃态转化温度，木质素熔融流展均匀，产品的强度和耐水性明显提高。蒸爆法是有效的纤维分离方法，制浆得率高，细胞壁主要成分纤维素、半纤维素、木质素均被用于制备无胶纤维板。目前，一些学者利用杨木、棉秆、椰壳等通过蒸爆处理后，在适宜的条件下都可以制得性能较好的无胶纤维板<sup>[7-9]</sup>。因此，蒸爆法制备无胶纤维板符合国家建设环境友好型、资源节约型经济社会的要求。本研究采用红外吸收光谱法、热分析法探讨在热压过程中竹材加工剩余物蒸爆纤维木质素结构变化规律，为确定热压工艺及研究无胶黏结机制提供理论依据。

## 1 材料和方法

### 1.1 材料的准备

试验所用原料为毛竹 *Phyllostachys edulis* 材加工剩余物，取自浙江省临安市板桥竹材加工厂。

### 1.2 蒸煮爆破处理

称取毛竹材加工剩余物 200 g 放入蒸煮反应釜(PF5-3.0 蒸煮蒸爆仪，反应釜体积为 5 L)中，加入 2 L 水，在 220 ℃下分别蒸煮 10, 15, 20 min 后突然减压，得到蒸煮爆破浆料，将浆料和蒸煮液在自然条件下风干，含水率约为 12%。

### 1.3 纤维板的制备

将蒸爆竹纤维按试验设计称量，然后将纤维均匀地铺装在 20 cm × 20 cm 的模具内制成板坯，将预压好的板坯送入热压机热压成纤维板。热压温度为 170 ℃。热压过程由水解段、排气段、塑化段组成，其中水解段、塑化段热压压力为 4.05 MPa，排气段热压压力为 1.50 MPa；水解段热压时间为 30 s·mm<sup>-1</sup>，排气段热压时间为 4 s·mm<sup>-1</sup>；塑化段热压时间为 26 s·mm<sup>-1</sup>。热压的毛边板冷却后锯边，制得无胶纤维板。

### 1.4 无胶纤维板的物理力学性能

按照国家标准 GB/T 11718-1999，测试指标包括静曲强度(MOR)，弹性模量(MOE)，内结合强度(IB)，24 h 浸泡处理厚度膨胀率(TS)。

### 1.5 磨木木质素(MBL 或 Björkman lignin)及二氧六环木质素的提取

将脱去提取物的竹粉在振动球磨(Irie Shokai Co. Ltd., Tokyo, Japan)中磨 72 h。将充分磨碎的竹粉及碎过 40 目的蒸爆浆料和无胶纤维板分别用二氧六环水溶液(体积比为 9:1)提取 3 次后，采用 Björkman 的改进方法进行提纯，得到竹磨木木质素(milled bamboo lignin, MBL)，蒸爆浆料木质素(steam exploded bamboo pulp lignin, SEBPL)和无胶纤维板木质素(steam exploded bamboo board lignin, SEBBL)。

### 1.6 无胶纤维板的表征

红外光谱表征：将样品经溴化钾压片后在岛津 IRPrestige-21 红外光谱仪上做红外分析。热分析：采用德国耐驰 STA409-PC 同步热分析仪进行热分析测试。以高纯氮气为保护气。设定起始温度为 20 ℃，升温速度 20 ℃·min<sup>-1</sup>，终点温度为 500 ℃，氮气流量为 25 mL·min<sup>-1</sup>。

## 2 结果与讨论

### 2.1 木质素的提取

磨木木质素是依靠机械力破坏木质素和多糖之间的结合力，用中性溶剂(常用二氧六环水溶液)提取的木质素，是目前公认的获得最近似原本木质素的分离方法。蒸爆纤维用二氧六环水溶液处理，得到了得率比振动球磨法还要高的木质素，表明蒸爆削弱了木质素与多糖间的结合力以及部分木质素被降解成

低分子苯酚类物质。Shao 等<sup>[3]</sup>用电子显微镜观察到蒸爆纤维表面有很多颗粒,而二氧六环水溶液提取后的纤维表面光滑、无颗粒,结果表明蒸爆处理使填充在细胞间层或次生壁微纤丝之间的木质素裸露到纤维表面。Sudo 等<sup>[10]</sup>采用甲醇提取白桦 *Betula platyphylla* 木材蒸爆(28 kg·cm<sup>-2</sup>, 16 min)纤维,获得棕色油状物,而这种油状物是在蒸爆过程中裸露到纤维表面的低分量木质素。通过实验可知,采用 Björkman 法提取竹粉的木质素(MBL)得率为 16.4%,采用二氧六环法提取的木质素,不同蒸爆时间的蒸爆浆料提取的木质素(SEBPL)得率分别为 20.0%, 22.5%, 22.5%,对应无胶纤维板提取的木质素(SEBBL)得率分别为 18.8%, 20.0%, 20.0%, SEBBL 和 SEBPL 含量均高于 MBL。SEBBL 低于 SEBPL,表明在蒸爆过程中裸露到纤维表面的低分子化的部分木质素在热压过程中生成木质素-木质素聚合物或木质素与多糖的降解产物形成木质素-多糖复合体,因而难以被二氧六环水溶液提取。

## 2.2 红外光谱分析

采用红外吸收光谱(FTIR)法对 MBL 和 SEBPL 进行表征(图 1)。毛竹木质素是一种典型的禾本科 Gramineae 木质素,是松柏醇、芥子醇、对香豆醇混合脱氢聚合物<sup>[11]</sup>。红外吸收光谱中波数 1 423, 1 500 和 1 604 cm<sup>-1</sup> 的苯环骨架伸缩振动峰是木质素结构特征峰, SEBPL 和 MBL 在 1 423, 1 500 和 1 604 cm<sup>-1</sup> 的吸收特征相似,表明蒸爆后保留了木质素芳香环的结构特征。SEBPL 与 MBL 相比, 1 660 ~ 1 710 cm<sup>-1</sup> 吸收峰的区别特别明显(图 1)。木质素的红外光谱图中, 1 660 cm<sup>-1</sup> 是与木质素苯环共轭羰基 C=O 的特征峰, MBL 在 1 660 cm<sup>-1</sup> 处有较强吸收峰,而 SEBPL 在 1 660 cm<sup>-1</sup> 处的吸收峰消失,表明在蒸爆处理过程中与芳香环共轭的羰基裂解和消失。竹材木质素含有 5% ~ 10% 的对-香豆酸(*p*-coumaric acid)和阿魏酸(ferulic acid),被酯化到木质素侧链的  $\alpha$ - or  $\gamma$ -羟基上<sup>[12]</sup>。波数 1 710 cm<sup>-1</sup> 是与芳香环非共轭的羧基及其酯的特征峰, SEBPL 在 1 710 cm<sup>-1</sup> 有很强的吸收峰,且其吸收峰强度随蒸爆处理时间的延长而增加(图 1),表明在蒸爆过程中木质素侧链的酯键、醚键断裂,形成游离的酚羟基。Shao 等<sup>[3]</sup>报道竹蒸爆纤维木质素酚羟基含量较竹粉木质素高 2.5 倍。在热压过程中,这些游离的酚羟基有利于与多糖的降解产物糠醛或羟基糠醛聚合,生成类似酚醛树脂的缩合物,对纤维间的结合有利。

## 2.3 木质素热性质

竹材由纤维素、半纤维素及木质素三大组分构成,其热解是这些有机高分子组成成分的热解过程的叠加。竹粉失重起始温度为 240 °C,蒸爆纤维失重起始温度为 180 °C。竹粉在 240 °C 附近有 1 个失重拐点,竹粉细胞壁中木质素和多糖之间以化学键或次价键粘在一起,因此,竹粉只有 1 个失重拐点。蒸爆纤维在 180 °C 和 250 °C 有 2 个拐点,表明蒸爆过程中细胞壁三大成分纤维素、半纤维素、木质素发生分离(图 2)。半纤维素热解温度较低,通常出现在 164 °C,纤维素主要热分解区域为 250 ~ 350 °C<sup>[13]</sup>。早在 1968 年, Baldwin 和 Goring<sup>[4]</sup>发现未经蒸汽处理的杨木在 230 °C 有 1 个单一的软化转折点,而蒸汽处理的杨木浆在 108 °C 和 208 °C 处有 2 个明显的转折点。利用竹材加工剩余物蒸爆纤维制备的无胶纤维板在 240 °C 与竹粉的失重曲线交汇,240 °C 以上,失重率较竹粉低,表明在热压过程中生成了难以热解的聚合物。竹材加工剩余物、蒸爆纤维及其无胶纤维板在 240 ~ 350 °C 失重最明显,表明纤维素、半纤维素及木质素发生热分解,释放出二氧化碳和一氧化碳等气体<sup>[4]</sup>。竹材加工剩余物 Björkman 法提取的木质素(MBL)与蒸爆纤维木质素(SEBPL)和无胶纤维板木质素(SEBBL)分别在 130 °C 和 160 °C 失重曲线交汇。SEBPL 失重率较 MBL 高,SEBBL 在 160 °C 有微弱的失重后在 220 °C 与 MBL 的失重曲线重叠,220 °C 以后比 MBL 失重缓慢(图 3)。

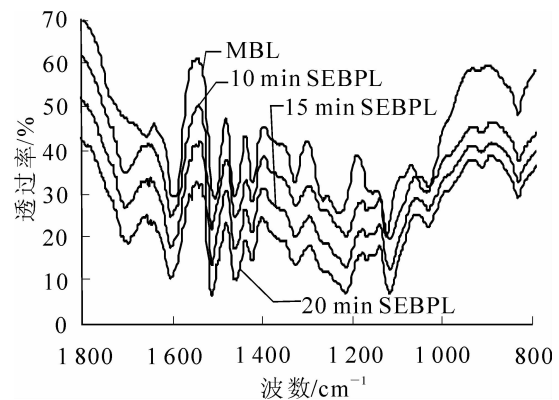


图 1 竹粉木质素和蒸爆浆木质素的红外吸收光谱  
Figure 1 FTIR spectra of MBL and SEBPL from different steaming time pulp



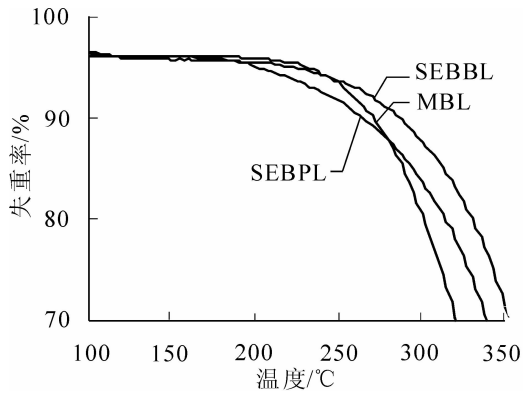


图 2 竹粉、蒸爆浆和无胶纤维板热重曲线

Figure 2 TG curves of bamboo meal, steam exploded pulp and binderless board

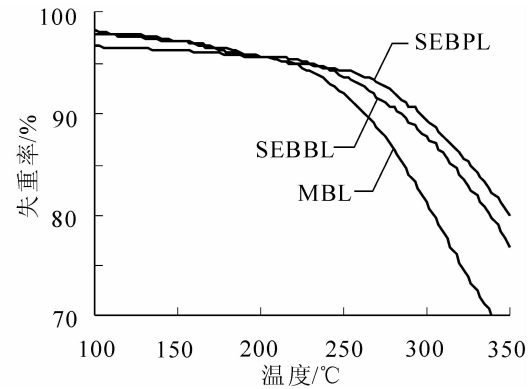


图 3 MBL, SEBPL 和 SEBBL 的热重曲线

Figure 3 TG curves of MBL, SEBPL and SEBBL

木质素是热可塑性的高分子化合物，具有无定性高聚物的玻璃态转化性质，在玻璃态转化温度以下，木质素呈玻璃固态。但若在玻璃态转化温度以上时，引起木质素分子运动加快，表面积增大，表面适应性加强，分子键发生运动，木质素软化变黏，并具有胶黏力<sup>[4-5]</sup>。木质素的热性质与纤维板的生产过程有密切关系。SEBPL 玻璃态转化温度为 130 °C，明显低于 MBL 的 155 °C(图 4)，表明蒸爆过程中木质素被低分子化。木质素的玻璃态转化温度一般为 127 ~ 193 °C，分子量低的木质素玻璃态转化温度低，分子量为 85 000 和 4 300 的 2 种二氧六环木质素，玻璃态转化温度分别为 176 °C 和 127 °C<sup>[4]</sup>。铃木等用 <sup>13</sup>C 核磁共振法<sup>[2]</sup>，Shao 等<sup>[14]</sup>用臭氧分解法证实了蒸爆过程中大部分木质素芳基甘油醇-β-芳基醚结构降解成低分子。竹材木质素含有 50 ~ 100 g·kg<sup>-1</sup> 的对-香豆酸(*p*-coumaric acid)和阿魏酸(ferulic acid)，被酯化到木质素侧链的 α-or γ-羟基上<sup>[12]</sup>。蒸爆过程中木质素大分子的化学键断裂，尤其是木质素与对香豆酸间的醚键断裂，使得 SEBPL 的分子量明显低于 MBL，增加了酚羟基和对-羟基苯甲醛的质量分数，与红外吸收光谱分析结果一致。

蒸爆处理 10, 15, 20 min 的蒸爆纤维木质素玻璃态转化温度依次为 130, 125 和 115 °C，明显低于 MBL 的 155 °C(图 4)，表明蒸爆处理过程中木质素大分子的化学键断裂，低分子化，蒸爆处理时间延长，木质素低分子化程度高。SEBPL 均在 170 °C 开始出现聚合反应的放热峰，且 SEBPL 玻璃态转化温度(115~130 °C)均明显低于制备无胶纤维板的热压温度 170 °C。热压温度 170 °C 时，足以使木质素分子键发生运动，木质素熔融软化变黏，在高压下流展，使纤维表面覆盖物之间的界面消失而融为一体，冷却后将纤维牢固地重新粘合起来，为无胶纤维板制板工艺中利用木质素的热塑熔融作用提供了理论依据。

利用在 220 °C 下分别蒸爆处理 10, 15, 20 min 的纤维，在 170 °C 热压温度下制备无胶纤维板。无胶纤维板物理力学性能测试后粉碎过 40 目，采用二氧六环水溶液提取的木质素。SEBPL 玻璃态转化温度为 115~130 °C，而 SEBBL 分别在 115 °C 附近和 200 °C 有 2 个软化特征吸热峰。SEBBL 在 200 °C 软化特征吸热峰可能源于在蒸爆过程中由于突然减压填充在胞间层或细胞壁的木质素裸露到纤维表面的低分子化的部分木质素在热压过程形成的木质素-木质素聚合物或木质素与多糖的降解产物聚合形成木质素多糖复合体(LCC)。蒸爆处理 20 min 的 SEBBL 玻璃态转化温度较 10 min 和 15 min 的 SEBBL 低(图 5)。

#### 2.4 无胶纤维板的物理力学性能

蒸爆处理温度 220 °C(蒸汽压力 2.3 MPa)时，弹性模量和静曲强度随着维压时间的延长而降低(表 1)。维压时间延长，纤维细胞受损越大，长纤维比例越小，使纤维本身强度下降，从而降低制品的静曲强度和弹性模量。内结合强度(IB)随蒸爆时间的延长有所提高，从 10 min 的 0.32 MPa 提高到 20 min 的 0.44 MPa(表 1)。维压时间延长，纤维的分离程度越高，木质素玻璃态转化温度低(图 4 和图 5)，热压过程中木质素的流展均匀，提高其结合强度。吸水厚度膨胀率(TS)均优于国家标准(GB/T 11718-1999)，说明具有良好的尺寸稳定性。半纤维素是木质纤维原料中吸水性较强的物质，竹材加工剩余物蒸爆处理后，半纤维素发生了大幅度降解，使得制品的吸水性有所降低。另一方面，蒸爆过程中木质素裸露到纤维表面，在热压过程中重新聚合沉积于纤维表面，从而改善了制品的吸水性<sup>[12]</sup>。

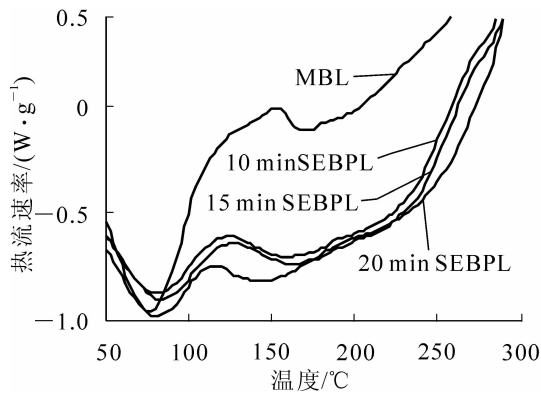


图4 竹粉和蒸爆浆木质素的DSC曲线

Figure 4 DSC curves of MBL and SEBPL from different steaming time pulp

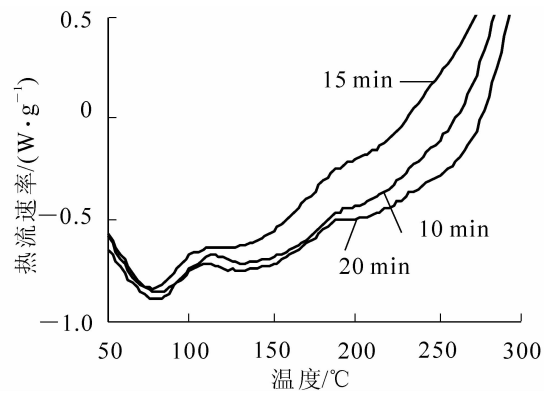


图5 无胶纤维板木质素的DSC曲线

Figure 5 DSC curves of 10 min SEBBL, 15 min SEBBL and 20 min SEBBL

表1 无胶纤维板物理力学性能

Table 1 Properties of binderless boards

蒸爆条件	静曲强度/MPa	弹性模量/MPa	内结合强度/MPa	吸水膨胀率/%
220 °C, 10 min	14	2 699	0.32	15
220 °C, 15 min	11	2 494	0.41	12
220 °C, 20 min	10	2 072	0.44	15

说明: 纤维含水率为12%, 密度为 $0.8 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ , 厚度为8 mm, 热压温度为170 °C。

### 3 结论

竹材加工剩余物蒸爆纤维木质素含量高于竹粉磨木木质素, 表明木质素裸露到纤维表面。竹无胶纤维板的木质素含量低于其原料蒸爆纤维, 说明蒸爆过程中低分子化的木质素在热压过程中形成高分子缩合物。

红外吸收光谱分析结果表明: 蒸爆浆木质素保留了木质素芳香环的结构特征, 但蒸爆过程中木质素侧链的酯键、醚键断裂, 使蒸爆纤维木质素游离酚羟基含量高。

竹材加工剩余物蒸爆纤维木质素玻璃化温度低于竹粉磨木木质素, 且随蒸爆处理维压时间的延长玻璃化温度降低。竹无胶纤维板木质素分别在115 °C附近和200 °C有2个软化特征吸热峰。在200 °C的吸热峰源于热压过程生成的木质素-木质素聚合物或木质素多糖复合体(LCC)。

蒸爆处理时间长, 纤维降解, 竹无胶纤维板的静曲强度和弹性模量降低, 而内结合强有所提高。竹材加工剩余物蒸爆纤维制备的无胶纤维板具有良好的尺寸稳定性。

### 参考文献:

- [1] 宋先亮, 殷宁, 潘定如. 爆破法制浆技术的研究现状[J]. 北京林业大学学报, 2003, **25** (4): 75 - 79.  
SONG Xianliang, YIN Ning, PAN Dingru. A review on reseaches of explosion pulp [J]. *J Beijing For Univ*, 2003, **25** (4): 75 - 79.
- [2] SUZUKI S, SHINTANI H, PARK SY, *et al.* Preparation of binderless boards from steam exploded pulps of oil palm (*Elaeis guineensis* Jaxq.) fronds and structural characteristics of lignin and wall polysaccharides in steam exploded pulps to be discussed fro self-bindings [J]. *Holzforchung*, 1998, **52** (4): 417 - 426.
- [3] SHAO Shunliu, WEN Guifeng, JIN Zhenfu. Changes in chemical characteristics of bamboo (*Phyllostachys pubescens*) components during steam explosion [J]. *Wood Sci Technol*, 2008, **42** (6): 439 - 451.
- [4] 蒋挺大. 木质素[M]. 北京: 化学工业出版社, 2009: 49 - 51.
- [5] BALDWIN S H, DAI Goring. The thermoplastic and adhesive behaviour of thermomethcnical pulps from steamed wood

- [J]. *Svensk Papperstidn*, 1968, **18**: 646 – 650.
- [6] BOUAJIL A J, LIMARE A, JOLY C, *et al.* Lignin plasticization to improve binderless fiberboard mechanical properties [J]. *Polym Eng Sci*, 2005, **45** (6): 809 – 816.
- [7] 陆熙娴, 秦特夫, 颜镇, 等. 杨木爆破处理及制板的研究[J]. 林业科学, 1997, **33** (4): 365 – 373.  
LU Xixian, QIN Tefu, YAN Zhen, *et al.* Study on steam explosion and pressing particleboard of popular wood [J]. *Sci Silv Sin*, 1997, **33** (4): 365 – 373.
- [8] 何翠芳, 周晓燕, 朱亮. 蒸爆法棉秆无胶纤维板热压工艺初探[J]. 林产工业, 2009, **36** (1): 15 – 17.  
HE Cuifang, ZHOU Xiaoyan, ZHU Liang. Preliminary study on hot-pressing technology of binderless fiberboard from steam-exploded cotton stalk [J]. *China For Prod Ind*, 2009, **36** (1): 15 – 17.
- [9] van DAM J E G, van den OEVER M J A, KEIJISERS E R P, *et al.* Production process for high density high performance binderless boards from whole coconut husk [J]. *Ind Crops & Prod*, 2004, **20** (1): 97 – 101.
- [10] SUDO K, SHIMIZU K, SAKURAI K. Characterization of steamed wood lignin from beech wood [J]. *Holzforschung*, 1985, **39** (5): 281 – 288.
- [11] HIGUCHI T. Chemistry and biochemistry of bamboo [J]. *Bamboo J*, 1987, **4**: 132 – 144.
- [12] HIGUCHI T. Bamboo[G]//BEVER M B. *Encyclopedia of Materials Science and Engineering*. Oxford: Pergamon Press, 1986.
- [13] 李文珠, 何拥军, 陈普. 用热分析法研究竹材热解特性影响因素[J]. 竹子研究汇刊, 2006, **25** (2): 31 – 34.  
LI Wenzhu, HE Yongjun, CHEN Pu. The factors influencing the characteristics of bamboo pyrolysis, a hot analytic approach [J]. *J Bamboo Res*, 2006, **25** (2): 31 – 34.
- [14] SHAO Shunliu, JIN Zhenfu, WEN Guifeng, *et al.* Thermo characteristics of steam-exploded bamboo (*Phyllostachys pubescens*) lignin [J]. *Wood Sci Technol*, 2009, **43** (7–8): 643 – 652.
- [15] 陈洪章, 李佐虎. 麦草蒸汽爆破处理的研究(Ⅱ)麦草蒸汽爆破处理作用机制分析[J]. 纤维素科学与技术, 1999, **12** (4): 14 – 22.  
CHEN Hongzhang, LI Zuohu. Studies on the steam explosion of wheat straw (Ⅱ) mechanisms of steam explosion of wheat straw [J]. *J Cellul Sci Technol*, 1999, **12** (4): 14 – 22.