# 响应面法优化豆胶强化地板平衡纸压贴工艺

杨波[1]，卢晶昌[1]，杨光[1]，王丹丹[1]，李琴[2]，袁少飞[2]
（1.上海理工大学，上海 200093；2.浙江省林业科学研究院，杭州 310023）

**摘要：目的** 探索大豆蛋白胶用于强化地板平衡纸的压贴工艺，解决强化地板释放甲醛的问题。**方法** 以大豆蛋白胶为胶黏剂，进行平衡纸与地板的热压，采用响应面法优化强化地板平衡纸的热压工艺，**结果** 施胶量为 217.4 g/m$^2$，热压温度 133.6 ℃，热压时间为 2.3 min，热压压力为 2.6 MPa，板面涂水量为 96.9 g/m$^2$，此时的表面胶合强度达到 1.31 MPa，符合 GB/T 18102—2007 的要求。**结论** 大豆蛋白胶可以用于强化地板平衡纸的压贴。

**关键词：**大豆蛋白胶；平衡纸；表面胶合强度；响应面法
**中图分类号：**TQ430.3；TS761.4 **文献标识码：**A **文章编号：**1001-3563(2016)13-0065-06

## Optimization of Pressing Parameters of Equilibrium Paper Using Soy Protein-based Adhesive for Laminate Flooring with Response Surface Methodology

*YANG Bo*[1], *LU Jing-chang*[1], *YANG Guang*[1], *WANG Dan-dan*[1], *LI Qin*[2], *YUAN Shao-fei*[2]
(1.University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China;
2.Zhejiang Forestry Science Research Institute, Hangzhou 310023, China)

**ABSTRACT:** To solve the problem of formaldehyde releasing from laminate flooring, the hot-pressing technology of equilibrium paper with soy protein-based adhesive for laminate flooring was studied. The protein-based adhesive could be used to press equilibrium paper and laminate flooring. The hot-pressing technology of equilibrium paper with soy protein-based adhesive for laminate flooring was optimized by using response surface method. It was found that soy protein-based adhesive could be used to press equilibrium paper in hot-pressing technology. The parameters used for the hot-pressing temperature, hot-pressing pressure, hot-pressing time and adhesive dosage were controlled at 133.6 ℃, 2.6 MPa, 2.3 min, 96.9 g/m$^2$ respectively during hot pressing. Moreover, the surface bond strength reached 1.31 MPa, which met the National Standard: GB/T 18102—2007. In conclusion, soy protein-based adhesive could be used to press equilibrium paper for laminate flooring.

**KEY WORDS:** soy protein-based adhesive; equilibrium paper; surface bonding strength; response surface method

在家具装修行业，强化地板因价廉物美而倍受广大消费者的青睐，与实木地板相比，其优点是耐磨、容易打理，整体的稳定性强，不易变形。强化复合地板是一种以人造板为基材，经贴面、裁截和槽榫企口加工而成的新型木质复合地板，它的基本结构是以高密度纤维板、中密度纤维板或特殊形态的优质刨花板为基材，表面胶贴表层纸和装饰纸、背面胶贴平衡纸组合而成[1—2]，实验所用的平衡纸起着平衡和稳定强化木地板尺寸的作用，使其外观平整、尺寸稳定、不变形、不翘曲，同时也能起到一定的防潮作用。

目前国内强化地板压贴各层纸工艺上多采用

**收稿日期：**2015-11-12
**基金项目：**浙江省科技计划（2016F50020）；浙江省重大科技专项重点农业项目（2011C12050）
**作者简介：**杨波（1968—），女，河南郑州人，高级实验师，主要研究方向为蛋白质的改性研究。

树脂浸渍且大部分为“三醛胶”，浸渍方式普遍为二次浸渍，即第 1 次浸渍脲醛树脂，经干燥后再浸渍三聚氰胺树脂[3—4]；甲醛是“三醛胶”的主要生产原料之一，因此应用三醛胶加工出来的强化地板不可避免地会产生甲醛气体[5—7]。为了解决这一难题，许多学者开始转向生物胶的研究，其中具有突破性进展的是大豆蛋白胶黏剂的开发应用[8—11]，研究者把改性大豆蛋白胶应用于各种板材的热压工艺实验[12—14]，但关于强化地板平衡纸的热压工艺研究甚少。研究大豆蛋白胶与强化地板压贴工艺，对实际生产具有重要的环保意义，并对大豆蛋白胶应用于包装行业有重大的意义。

这里以大豆蛋白胶为胶黏剂，对强化地板平衡纸的压贴进行了实验，以地板的胶合强度为响应值，应用响应面法优化强化地板平衡纸的热压工艺，以期使得胶合强度达到 GB/T 18102—2007 要求的最佳工艺参数。

## 1 实验

### 1.1 材料与设备

材料：H120 型大豆蛋白胶(红褐色粘稠状的液体，固含量为 23.57%，黏度为 690 mPa·s)，上海泓涵化工科技有限公司；高密度纤维板(200 mm×200 mm×12 mm)，市售普通纤维板，嘉兴建材陶瓷市场图腾装饰商行；装饰纸(厚度 0.85 mm，克重数 80 g/m$^2$，型号 6003-16)，临沂泰邦装饰材料厂。

设备：yx-25(D)半自动压力成型机，上海西玛伟力橡塑机械有限公司；JM-B 10 kg 电子天平，余姚市纪铭称重校验设备有限公司；AGS-J(10 kN)电子万能试验机，日本岛津制造所；DHG-9203A 电热恒温鼓风干燥箱，上海华连医疗器械有限公司；KTS205/1000E 电动台锯，英国 KEWINNER 公司；ZHX-13 台式钻床，中国杭州西湖台钻有限公司。

### 1.2 方法

#### 1.2.1 材料准备

用电动台锯将 1.22 m×2.44 m 的高密度纤维板锯为(200±3)mm×(200±3)mm 实验用单板，将锯好的密度板置于 70 ℃电热恒温鼓风干燥箱中干燥 1 h。将实验用装饰纸用裁纸机裁剪为(210±3)mm×(210±3)mm 规格的实验用纸，并于 70 ℃电热恒温鼓风干燥箱中干燥至恒重。

#### 1.2.2 平衡纸压贴工艺

1) 单板整理。将高密度纤维板从干燥箱中取出，冷却至室温，整理板面使平整。

2) 施胶。施胶量为 160 g/m$^2$，单面涂胶，在装饰纸背面用毛刷均匀涂抹定量大豆蛋白胶，纸面无缺胶。

3) 干燥。对施胶后的平衡纸于烘箱中干燥至恒重，干燥温度为 50℃。

4) 板面涂水。在高密度纤维板板面(与平衡纸接触面)均匀涂水，目的是使蛋白胶更好地润湿纤维板表面，提高粘结强度。

5) 组坯。将密度板，平衡纸等按顺序依次贴合，待热压。

6) 热压。组坯后，将其水平放入热压机的加热板之间，合模，开始热压，热压完成后自动开模。

7) 检测。测定表面胶合强度。

根据 GB/T 18102—2007，GB/T 15102—2006 和 GB/T 17657—1999，用台锯将贴有装饰纸的密度板锯为(50±1)mm×(50±1)mm 的木块，将试件的上表面用铣刀铣一环形槽，槽的内径为 35.7 mm(圆的面积为 1000 mm$^2$)，深度为 0.3~0.8 mm。试件经铣槽后用砂纸轻砂，并除去粉尘。试件在(20±2)℃，相对湿度(65±5)%条件下放置至质量恒定。用热熔胶将卡头和试件的圆表面胶合在一起，防止胶液溢入槽内。胶粘时压强为 0.1~0.2 MPa，冷却后将试件装在电子万能试验机上，测定试件的表面胶合强度，记下最大载荷值，精确至 10 N。试件表面胶合强度精确至 0.01 MPa，计算方式如下：

$$\sigma = \frac{P_{\max}}{S_2}$$

式中：$\sigma$ 为表面胶合强度(MPa)；$P_{\max}$ 为试件表面装饰纸破坏时的最大载荷(N)；$S_2$ 为试件与卡头的粘结面积，即 1000 mm$^2$。

一张板的表面结合强度是同一张板内所有试件表面胶合强度的算术平均值。根据 GB/T 18102—2007，表面结合强度≥1 MPa 为合格[15—17]。

#### 1.2.3 响应面实验设计

实验采用 Box-Behnken 的中心组合试验设计原理，选取施胶量、热压温度、热压时间、热压压

力、板面涂水量 5 个因素，以平衡纸表面胶合强度为检测指标，按照工艺流程，即单板整理—施胶—干燥—板面涂水—组坯—热压—检测，进行实验，将涂胶后并干燥至恒重的平衡纸与高密度纤维板组坯热压。通过 Design Expert 7.0 软件对实验结果进行数据分析，得出热压平衡纸的最优工艺条件。实验因素水平编码见表 1，其中-1 代表低水平；0 代表中间水平；1 代表高水平。

**表 1　Box–Behnke 设计实验因素及水平**
**Tab.1 Levels and factors chosen for the experiments**

| 编码 | 施胶量 /(g·m$^{-2}$) | 热压温度/℃ | 热压时间 /min | 热压压力 /MPa | 板面涂水量 /(g·m$^{-2}$) |
|---|---|---|---|---|---|
| -1 | 140 | 110 | 1 | 1.5 | 70 |
| 0 | 180 | 130 | 2 | 2.5 | 90 |
| 1 | 220 | 150 | 3 | 3.5 | 110 |

## 2　结果与分析

### 2.1　响应面实验结果与分析

应用 Design Expert 7.0 软件，分别拟合响应值表面胶合强度与 5 个变量(施胶量、热压温度、热压时间、热压压力、板面涂水量)之间的二次多元回归方程(模型)，并对模型进行显著性检验和失拟性检验，对模型的偏回归系数进行显著性检验。绘制各响应值与影响因子之间的响应曲面图及等高线图，分析施胶量、热压温度、热压时间、热压压力、板面涂水量对大豆蛋白胶平衡纸的力学性能和物理性能的影响规律。

根据响应面试验结果，分析施胶量 $A$、热压温度 $B$、热压时间 $C$、热压压力 $D$、板面涂水量 $E$ 对大豆蛋白胶平衡纸的力学性能和物理性能的影响规律。

从表 2 可以看出，该模型 $P$ 值小于 0.0001，在 $\alpha$=0.01 水平上是极显著的，系数为 $R^2$=0.9455，校正系数为 0.9020，变异系数为 3.89%，进一步证明该模型的拟合程度较好，试验的误差小可以对大豆蛋白胶平衡纸的表面结合强度进行分析和预测，得到以平衡纸表面胶合强度为目标函数的二次回归方程：

$$\text{表面胶合强度}=1.19+0.11A+0.069B+0.078C+0.064D+0.020E+7.500\times10^{-3}AB+7.500\times10^{-3}AC+0.030AE-0.022BD-2.500\times10^{-3}BE-5.000\times10^{-3}CD+0.020CE+7.500\times10^{-3}DE-0.029A^2-0.18B^2-0.060C^2-0.043D^2-0.056E^2$$

**表 2　表面胶合强度方差分析结果**
**Tab.2 Analysis of variance for results of surface bond strength**

| 项目 | 平方和 | 自由度 | 均方 | $F$值 | $P$值 |
|---|---|---|---|---|---|
| 模型 | 0.74 | 20 | 0.037 | 21.70 | < 0.0001 |
| $A$ | 0.18 | 1 | 0.18 | 108.40 | < 0.0001 |
| $B$ | 0.077 | 1 | 0.077 | 45.15 | < 0.0001 |
| $C$ | 0.098 | 1 | 0.098 | 57.25 | < 0.0001 |
| $D$ | 0.065 | 1 | 0.065 | 38.12 | < 0.0001 |
| $E$ | $6.400\times10^{-3}$ | 1 | $6.400\times10^{-3}$ | 3.75 | 0.0641 |
| 残差 | 0.043 | 25 | $1.706\times10^{-3}$ | | |
| 失拟项 | 0.043 | 20 | $2.132\times10^{-3}$ | | |
| 净误差 | 0.000 | 5 | 0.000 | | |
| 总离差 | 0.78 | 45 | | | |
| $R^2$ | 0.9455 | | | | |
| 校正系数 | 0.9020 | | | | |
| 变异系数/% | 3.89 | | | | |

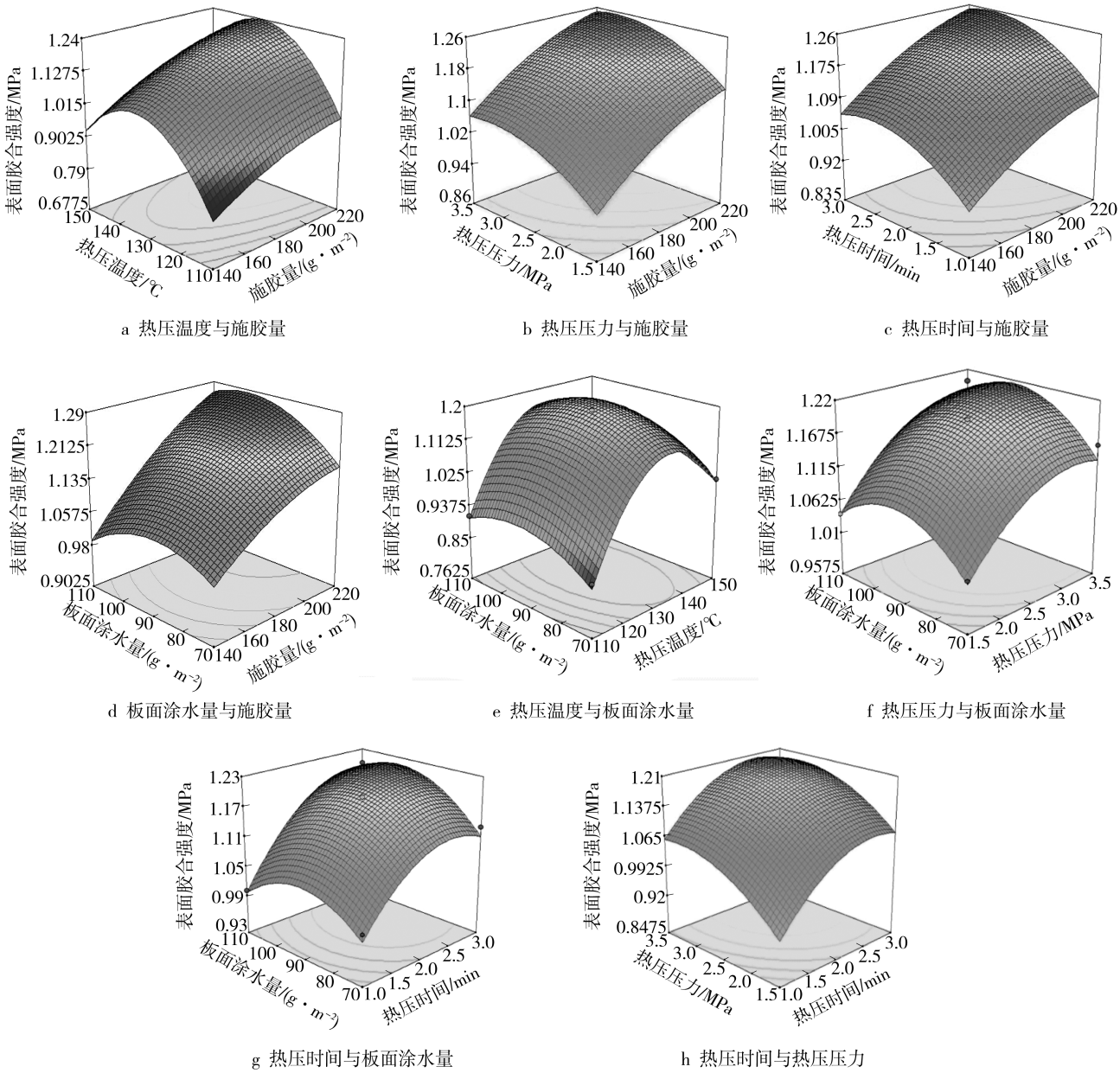
### 2.2　各因素对表面胶合强度影响的响应曲面

图 1a 显示了在热压时间为 2 min，热压压力为 2.5 MPa，板面涂水量为 80 g/m$^2$ 的条件下，热压温度与施胶量的交互作用对平衡纸表面胶合强度的影响，可以看出在热压温度不变的情况下，平衡纸的表面胶合强度随着施胶量的增加呈现逐渐增加的趋势，但当施胶量达到一定程度后，表面胶合强度的增加变缓；在施胶量不变的情况下，随着热压温度的增加，平衡纸表面胶合强度出现了先增大后

减小的趋势，其中在 133 ℃时出现了最大值，这是由于随着温度的增加，大豆蛋白胶不断固化，使其胶粘强度增强，但温度超过 140 ℃，造成大豆蛋白胶干裂，导致表面胶合强度减小。

图 1b 显示了在热压温度为 130 ℃，热压时间为 2 min，板面涂水量为 80 g/m$^2$ 的条件下，热压压力与施胶量的交互作用对平衡纸表面胶合强度的影响，可以看出，在施胶量不变的情况下，随着热压压力的增加，平衡纸的表面胶合强度呈现逐渐增加的趋势，这是由于随着热压压力的增加，大豆蛋白胶更加容易渗透到平衡纸纸层与板材纤维中去，因此表面胶合强度增加。

图 1c 显示了在热压温度为 130 ℃，热压温度为 2.5 MPa，板面涂水量为 80 g/m$^2$ 的条件下，热压时间与施胶量的交互作用对平衡纸表面胶合强度的影响，可以看出，在施胶量不变的情况下，随着热压时间的增加，平衡纸的表面胶合强度出现了逐渐增加的趋势，这是因为随着时间的延长，大豆蛋白胶能够与纸层和板材纤维逐渐充分接触，胶合强度增加较快，当热压时间继续延长时，表面胶合强度的增加不再明显。




a 热压温度与施胶量　b 热压压力与施胶量　c 热压时间与施胶量

d 板面涂水量与施胶量　e 热压温度与板面涂水量　f 热压压力与板面涂水量

g 热压时间与板面涂水量　h 热压时间与热压压力

图 1　各因素对平衡纸表面胶合强度影响的响应曲面

Fig.1 Response surface of the effects of various factors on the surface bond strength of equilibrium paper

图 1d 显示了在热压温度 130 ℃，热压时间 2 min，热压压力 2.5 MPa 的条件下，施胶量与板面涂水量的交互作用对平衡纸表面胶合强度的影响，可以看出，在施胶量不变的情况下，随着板面涂水量的增加，平衡纸的表面胶合强度呈现先是较快的增长，而后降低的趋势，这是由于水分在大豆蛋白胶压贴中起着传热及流动相的作用，在热压过程中，由于水分可以使大豆蛋白胶更好地扩散吸热，所以增加了其胶粘性，使得平衡纸表面胶合强度增加。

图 1e 显示了在施胶量为 180 g/m$^2$，热压时间为 2 min，热压压力为 2.5 MPa 的条件下，板面涂水量与热压温度的交互作用对平衡纸表面胶合强度的影响，可以看出，板面涂水量对平衡纸表面胶合强度的影响呈现正相关的趋势，热压温度对表面胶合强度的影响呈现先增大后减小的趋势。

图 1f 显示了在施胶量为 180 g/m$^2$，热压温度为 130 ℃，热压时间为 2 min 的条件下，热压压力和板面涂水量的交互作用对平衡纸的表面胶合强度的影响，可以看出，热压压力对平衡纸表面胶合强度的影响均呈现正相关的变化趋势，板面涂水量对胶合强度的影响存在一个最佳值，即 97 g/m$^2$。

图 1g 显示了在施胶量为 180 g/m$^2$，热压温度为 130 ℃，热压压力为 2.5 MPa 的条件下，板面涂水量与热压时间的交互作用对平衡纸表面胶合强度的影响，可以看出，涂水量与热压时间对平衡纸表面胶合强度的影响均呈现正相关的变化趋势，且影响显著。

图 1h 显示了在施胶量为 180 g/m$^2$，热压温度为 130 ℃，板面涂水量为 80 g/m$^2$ 的条件下，热压时间与热压压力对平衡纸表面胶合强度的影响，可以看出，热压时间与热压压力对平衡纸表面胶合强度的影响都呈现正相关的变化趋势。

Design Expert 7.0 软件提供了自动求最优解的功能，利用其“响应变量最优化”的功能可以直接获得最佳点的因素水平及最佳值。

由响应变量最优化的结果可知，热压温度 133.59 ℃，热压压力为 2.58 MPa，热压时间为 2.33 min，而热压压力、热压温度和热压时间机器可以调控，只要控制板面涂水量为 96.93 g/m$^2$，施胶量为 217.43 g/m$^2$，此条件下大豆蛋白胶平衡纸压贴的综合性能最佳。通过验证，在最优参数条件下，得到平衡纸的表面胶合强度为 1.31 MPa，达到 GB/T 18102—2007 的要求。

## 3　结语

通过响应面实验结果得出了最佳的工艺参数，即热压温度为 133.59 ℃，热压时间为 2.33 min，热压压力为 2.58 MPa，施胶量为 217.43 g/m$^2$，板面涂水量为 96.93 g/m$^2$，此时表面胶合强度达到 1.31 MPa，达到 GB/T 18102—2007 的要求。

## 参考文献：


[1] 吴智慧，卢克阳. 强化复合地板及其发展趋势[J]. 林业科技开发, 2001, 15(5):11—12.
WU Zhi-hui, LU Ke-yang. Laminate Flooring and Its Development Trend[J]. China Forestry Science and Technology, 2001, 15(5):11—12.

[2] KIM S, KIM H J. Effect of Addition of Polyvinyl Acetate to Melamine-Formaldehyde Resin on the Adhesion and Formaldehyde Emission in Engineered Flooring[J]. International Journal of Adhesion and Adhesives, 2005, 25(5):456—461.

[3] 马义明. 耐磨纸的生产方法[J]. 技术与市场, 2009, 16(2):141—142.
MA Yi-ming. Method for Producing Wear-Resistant Paper[J]. Technology and Market, 2009, 16(2):141—142.

[4] 丁亚南. DAP 树脂浸渍纸装饰板研究[J]. 木材加工机械, 2009, 20(1):86—100.
DING Ya-nan. Study on the Decorating Plates of DAP Resin Impregnated Paper[J]. Wood Processing Machinery, 2009, 20(1):86—100.

[5] BÖHM M, SALEM M, SRBA J. Formaldehyde Emission Monitoring from a Variety of Solid Wood, Plywood, Blackboard and Flooring Products Manufactured for Building and Furnishing Materials[J]. Journal of Hazardous Materials, 2012(1):68—79.

[6] AN J Y, KIM S, KIM H J. Emission Behavior of Formaldehyde and TVOC from Engineered Flooring in under Heating and air Circulation Systems[J]. Building and Environment, 2010, 45(8):1826—1833.

[7] KIM S. Environment-friendly Adhesives for Surface Bonding of Wood-Based flooring Using Natural Tannin to Reduce Formaldehyde and TVOC Emission[J]. Bioresource Technology, 2009, 100(2):744—748.

[8] 杨波，杨光，耿玮蔚，等. 大豆蛋白改性胶理化性质的研究[J]. 食品与发酵工业, 2011(12):85—88.
YANG Bo, YANG Guang, GENG Wei-wei, et al. Studies on the Physicochemical Properties of Modified Soy Protein-based Resin[J]. Food and Fermentation Industries, 2011(12):85—88.

[9] LIU Yuan, LI Kai-chang. Development and Characterization of Adhesives from Soy Protein for Bonding Wood[J]. International Journal of Adhesion and Adhesives, 2005, 27(1):59—67.

[10] LEI H, DU G, WU Z, et al. Cross-linked Soy-based Wood Adhesives for Plywood[J]. International Journal of Adhesion & Adhesives, 2014, 50(1):199—203.

[11] HUANG J, LI C H, LI K C. A New Soy Flour-polyepoxide Adhesive System for Making Interior Plywood[J]. Holzforschung, 2012, 66(4):427—431.

[12] 鲁听, 俞国飞. 甲基丙烯酸甘油酯改性大豆蛋白胶黏剂的制备及热压工艺优化的研究[J]. 包装工程, 2012, 33(1):54—57.
LU Ting, Yu Guo-fei. Study on Synthesis and Optimization of Hot-pressing Process of GMA Grafted Soy Bean Protein Adhesive[J]. Packaging Engineering, 2012, 33(1):54—57.

[13] 刘苗苗, 杨光, 李琴. 大豆蛋白胶竹地板制作工艺的优化[J]. 应用化工, 2013, 42(11):1981—1985.
LIU Miao-miao, YANG Guang, LI Qin. Optimization for Manufacturing Technology of Bamboo Flooring with Soy Protein Adhesive[J]. Applied Chemical Industry, 2013, 42(11):1981—1985.

[14] 陈奶荣, 林巧佳, 卞丽萍. 改性豆胶胶合板热压工艺优化及固化机理分析[J]. 农业工程学报, 2012, 28(11):248—253.
CHEN Nai-rong, LIN Qiao-jia, BIAN Li-ping. Curing Mechanism of Modified Soy-based Adhesive and Optimized Plywood Hot-pressing Technology[J]. Transaction of Chinese Society of Agricultural Engineering, 2012, 28(11):248—253.

[15] GB/T 18102—2007, 浸渍纸层压木质地板[S].
GB/T 18102—2007, Laminate Flooring[S].

[16] GB/T 15102—2006, 浸渍胶膜纸饰面人造板[S].
GB/T 15102—2006, Surface Decorated Wood-Based Panels with Paper Impregnated Thermosetting Resins [S].

[17] 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].