

## 核桃饼粕基无醛胶黏剂的性能探析

王 辉,周晓剑,袁明懂,农顺福

(西南林业大学 云南省木材胶黏剂及胶合制品重点实验室,云南 昆明 650224)

**摘 要:**以核桃饼粕为基本原料,支化聚合物为改性剂,对其在木材胶接上的效果进行研究,同时,利用 DSC 热分析方法对不同支化聚合物用量下体系的固化历程进行表征分析,并借助 FT-IR 分析方法和 SEM 表征手段对支化聚合物改性核桃饼粕复合体系的结构变化和形貌特征进行分析。结果表明,支化聚合物与核桃饼粕复合体系对木材胶接具有优良的强度和耐水性,且不同支化聚合物配比下体系的固化峰值温度和胶接强度有一定差别,最优可满足国标中Ⅱ类胶合板的要求。FT-IR 和 SEM 的分析进一步表明,支化聚合物与核桃饼粕之间形成氨基与羧基化学交联,形成的胶层更加致密、均匀和连续,是复合体系具有优良耐水性的重要化学基础。

**关键词:**核桃饼粕;支化聚合物;性能评价;无醛胶黏剂

**中图分类号:**S789.9

**文献标志码:**A

**文章编号:**1001-7461(2022)05-0236-06

Investigation on the Properties of Different Walnut Meal-Based Formaldehyde-Free Adhesives

WANG Hui, ZHOU Xiao-jian, YUAN Ming-dong, NONG Shun-fu

(Southwest Forestry University/Yunnan Provincial Key Laboratory of Wood Adhesives and Glued Products,  
Kunming, 650224 Yunnan, China)

**Abstract:** In this work, taking the oil meal of walnut kernel as the basic material, and with the branched polymer as a modifier agent, an aldehyde free adhesive was prepared. The performance of the adhesive in the wood cementation was investigated. Meanwhile, differential scanning calorimetry (DSC) was used to analyze its thermal curing characteristics, and its structure composition and morphology characteristics of cured resins were explored via FT-IR and SEM, respectively. The results indicated that the plywood produced with hybrid system of walnut meal and branched polymer had excellent bonding strength and water resistance, and the branched polymer content had an positive effect on mechanical performance, the best result of bonding strength could meet the requirements of type II plywood in national standard. The peak temperature of hybrid system was changing with branched polymer content. And the FT-IR and SEM results also indicated that the chemical crosslinking between walnut meal and branched polymer occurred via amino and carboxyl groups, and the compact, uniform and continuous characteristics were observed in cured hybrid system, which maybe an important chemical basis for excellent water resistance of the hybrid system.

**Key words:** walnut kernel meal; branched polymer; performance evaluation; formaldehyde-free adhesive

为解决化学合成类树脂造成的甲醛污染和危害,摆脱甲醛的困扰,对木材胶接用生物质类胶黏剂的研发越来越受关注,特别是以农林生物质材料或废弃物为原料进行胶黏剂的开发已逐渐形成研究趋

势。结合文献报道,生物质类胶黏剂的研发主要集中在蛋白类、淀粉类、木质素、单宁等方面<sup>[1-5]</sup>,其中以大豆蛋白胶黏剂的研究最为广泛,并取得了显著成效。然而,大规模发展大豆蛋白类胶黏剂不可避

收稿日期:2021-08-30 修回日期:2021-10-07

基金项目:云南省教育厅科学研究基金项目(2018JS336)。

第一作者:王 辉,博士,副教授。研究方向:木材胶黏剂。E-mail:w20030608016@126.com

免地会和人类食物供给形成强烈竞争,为此,寻找和开发可替代性蛋白类原料对缓解上述矛盾和提升蛋白类原料附加值具有重要意义。

核桃(*Juglans regia*),作为我国重要的经济树种之一,产量位居世界之首。据报道<sup>[6]</sup>,核桃仁中含有对人体有益的丰富氨基酸种类。目前,对核桃仁的主要加工方式是提取食用类油脂,而去油后的核桃饼粕含有丰富的蛋白质,根据不同加工方式,含量为40%~50%,而对核桃饼粕的利用除一部分作为饲料外,大部分视作废料弃用,造成了资源的极大浪费<sup>[7-8]</sup>。因此,开发和利用好此部分优质蛋白资源不仅可以在一定程度上缓解大豆蛋白的原料供应,还能有效促进核桃产业的健康发展。

基于核桃饼粕中丰富的蛋白质含量,尽可能保持胶黏剂的绿色环保特性。本研究以多氨基支化聚合物为交联改性剂,对不同加工方式下获得的核桃饼粕进行交联改性,考察在不同条件下核桃饼粕基蛋白胶黏剂的应用性能,为核桃饼粕的进一步合理利用以及在木材胶接方面的开发潜力提供依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验原材料

核桃饼粕类型Ⅰ,1次冷压榨后的产物,蛋白质含量43%,160目粉末,购自云南摩尔农庄生物科技有限公司;核桃饼粕类型Ⅱ,2次冷压榨后的产物,蛋白质含量50%,160目粉末,购自云南摩尔农庄生物科技有限公司;多氨基支化聚合物(HPEI),外观为无色黏稠液体,固体含量95%以上,平均分子量为7万u,购自云南晓月科技有限公司;氢氧化钠,分析纯(汕头市达濠区精细化学品有限公司);甲酸,分析纯(国药集团有限公司);蒸馏水等。

### 1.2 核桃饼粕预处理工艺

将160目的核桃饼粕粉按质量比1:8与蒸馏水进行混合后,常温下加入到三口烧瓶中,用30%的氢氧化钠溶液调节混合体系pH值为10,然后将其放入90℃水浴锅中,在持续搅拌下保温1h,即得核桃饼粕预处理样品,冷却后备用。

### 1.3 胶接体系制备

经过预处理的核桃饼粕,在常温下与多氨基支化聚合物按照一定比例混合,搅拌均匀后,调节pH值为7~8,作为木材胶接用胶黏剂。

### 1.4 固化特征测试

采用德国耐驰公司生产的Perkin Elmer DSC分析仪,称取5~10mg待测样品,置于铝坩埚中,密封,在氮气中以10K·min<sup>-1</sup>升温速率测试,温度范围25~200℃。

### 1.5 胶接强度测试

胶接强度采用实验室制备杨木胶接试件进行测试。分为2层杨木单板顺纹胶合和3层杨木单板纹理交叉结合进行测试。样品制备工艺参数为:手工双面施胶,施胶量200g·m<sup>-2</sup>,将施胶后的单板顺纹组合成双层胶接样品或纹理交错组成3层胶接样品,陈放3~5min后进行热压。热压工艺参数:热压温度160℃,热压压力1.5MPa,2层样品热压时间为3min、3层样品热压时间为4min。

胶接强度的测试参照GB/T 17657—2013标准中的相关规定分为干强度和湿强度。其中,湿强度的处理方法为:将被测试件常温下浸入冷水中24h后,拭去试件表面水分后再进行测试;将被测试件在60℃±3℃热水中浸泡3h,然后在室温下冷却10min后进行测试。

### 1.6 FT-IR 测试

试验采用美国Thermo Scientific公司的Nicolet iS50型傅里叶红外光谱仪进行样品测试分为固体样品和液体样品。固体样品采用KBr压片法进行测试,液体样品采用KBr涂片法进行测试。相关测试参数为:环境温度24~25℃,相对湿度≤60%,扫描范围500~4000cm<sup>-1</sup>,扫描次数为32次。

### 1.7 SEM 测试

测试用仪器为中科科仪的KYKY-EM6900型扫描电子显微镜,被测样品为固态粉末状,经过喷金处理后,用导电胶将其固定于样品台上,放入样品仓进行测试,测试电压为12.5kV。

## 2 结果与分析

### 2.1 不同核桃饼粕预处理液的特征

本研究中对2种不同压榨工艺条件下获得的核桃饼粕预处理液进行了对比分析,测试结果见表1。在相同处理工艺条件下,导致预处理液基本特征发生变化的根本原因在于核桃饼粕中主要成分含量,经过2次压榨后的核桃饼粕中具有相对较高的蛋白质含量,而且油脂的提取会更加充分,残留油脂率更低,因此,可以看到经过热解处理后体系的黏度会更高,而且颜色也更淡。由于预处理后体系的主要成分仍以蛋白质为主,未经任何防腐处理时常温储存周期是有限的,1周以后将会发生不同程度的腐变。

### 2.2 复配支化聚合物体系胶接性能分析

2.2.1 不同核桃饼粕类型的影响 为了分析不同核桃饼粕类型与胶接性能之间的关系,在经过预处理后的核桃饼粕液中加入相同比例的多氨基支化聚合物(HPEI)之后,进行了胶接强度的测试,其结果如图1所示。不同类型的核桃饼粕在经过相同工艺

处理之后,表现出了不同程度的胶接能力和耐水性能,相比类型Ⅰ的核桃饼粕,类型Ⅱ核桃饼粕中由于蛋白含量的增加和油脂含量的降低,具有较好的耐水能力,在经过冷水和 63℃ 热水浸泡处理后,胶接强度仍可满足国标要求( $\geq 0.7$  MPa)。同时,相较于干强度,经过水热处理后胶接强度的衰减非常明

表 1 不同核桃饼粕预处理液的基本特征

Table 1 The basic characteristics of different fluids of pretreated walnut meals

核桃饼粕类型	黏度/(MPa·s <sup>-1</sup> )	pH	存放时间/d(常温)	外观状态
类型Ⅰ	58	8.0	7	均一、深褐色液体
类型Ⅱ	70	8.0	7	均一、淡褐色液体

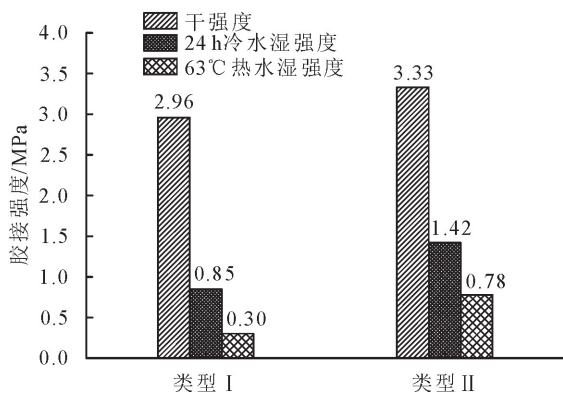


图 1 不同核桃饼粕类型与胶接强度关系

Fig. 1 The relationship between walnut meal type and bonding strength

2.2.2 不同支化聚合物添加量的影响 对不同支化聚合物添加比例条件下体系的胶接强度进行测试,结果见图 2、图 3。试件胶接强度的评价包含干强度、耐冷水强度和耐热水强度 3 个方面,需要指出的是,在干强度的测试过程中由于胶接强度普遍较高,大部分试样木材断裂,未能客观反映出胶层的真实结合强度,因此,干强度的变化仅作为参考,而样品经过水热处理后胶接强度的变化是重点。对比图 2 和图 3 中胶接强度的变化,在现有支化聚合物添加量条件下,类型Ⅰ饼粕体系经过 24 h 冷水浸泡后胶接强度在 0.85~1.53 MPa 变化,最高值为 1.53 MPa,对应支化聚合物用量比例为 5%,而类型Ⅱ饼粕体系在相同添加比例条件下,耐冷水强度分布在 1.4~1.9 MPa,最高值为 1.89 MPa。总体来看,支化聚合物与类型Ⅱ饼粕复合体系具有更高的胶接强度和抵抗冷水的能力。而样品在经过热水处理后胶接强度的变化相对比较平稳,而且变化趋势与冷水处理结果基本一致。综合考虑,对于类型Ⅰ饼粕体系,支化聚合物的加入量为 5% 时,效果最优,而类型Ⅱ饼粕体系,支化聚合物加入量在 3% 时,效果最佳。对比不同类型的饼粕胶接效果,与支化聚合物之间的复合比例控制在 3%~5% 较为理

显,可能是由于形成胶接强度交联键的结合能力较弱,水热作用即可发生破坏,亦或支化聚合物与核桃饼粕体系之间的交联程度不足,残留有大量游离的亲水基团未形成有效交联。为此,通过改变支化聚合物添加量以考察其对复合体系胶接强度的影响。

想。虽然 2 层板的试验结果令人满意,但与现有衡量标准有一定差距,因此,选择了效果更好的类型Ⅱ饼粕进行了 3 层胶合板的试验,结果见图 4,可以看出,类型Ⅱ饼粕应用于 3 层胶合板上也具有明显的效果,但支化聚合物用量的改变对热水处理后胶接强度的提升作用并不明显,从成本控制角度考虑,支化聚合物的添加量为 3% 即可满足要求。同时,对比图 3 和图 4 可以发现,3 层板材的胶接强度普遍要低于 2 层顺纹胶接强度,可能板材的组坯和纹理变化对交联体系的形成有一定影响。

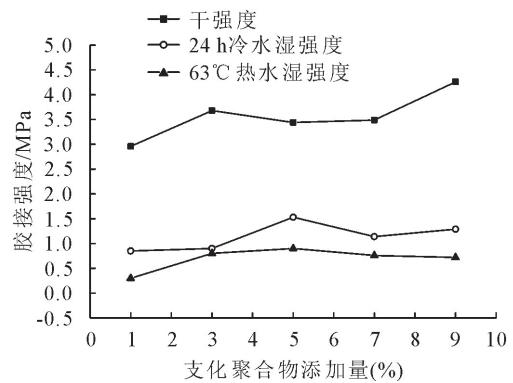


图 2 不同支化聚合物添加量对类型Ⅰ饼粕胶接强度的影响

Fig. 2 The impacts of branched polymer content on bonding strength of type I walnut meal

### 2.3 复合体系固化特征分析

为了解支化聚合物与核桃饼粕之间的相互作用,用差示扫描量热仪(DSC)对不同复合体系的固化历程进行了表征,测试结果见图 5。可以发现,不同支化聚合物添加量条件下,复合体系固化特征温度有明显差别。而固化峰值温度的不同,意味着复合体系固化过程中交联结构形成的难易程度不同。随着复合体系中支化聚合物的加入,固化峰值温度先下降后上升,这一现象的变化说明支化聚合物控制在一定比例范围内,支化聚合物与核桃饼粕体系之间可以形成理想的交联,而且相对于核桃饼粕自身的交联而言,交联反应更易进行。而当支化聚合



物加入比例 $\geq 7\%$ 时,复合体系固化峰值温度也呈现上升的变化,说明固化交联反应需要在更高的能量条件下才可达到理想固化状态。在本试验中,结合不同复合体系的固化特征,将热压温度设置为 $160\text{ }^{\circ}\text{C}$ 可以满足固化需求,但由于固化特征温度的变化,在相同条件下固化交联的难易程度有一定差别,这可能也是导致胶接强度不同的原因之一。

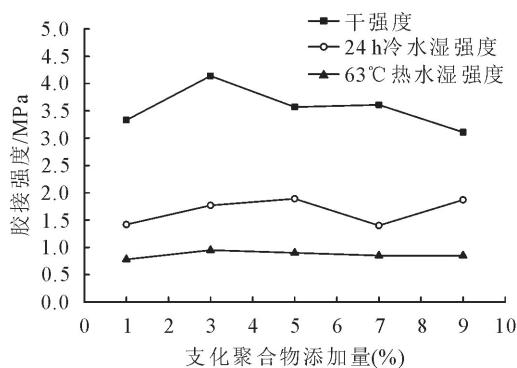


图3 不同支化聚合物添加量对类型Ⅱ饼粕胶接强度的影响

Fig. 3 The impacts of branched polymer content on bonding strength of type II walnut meal

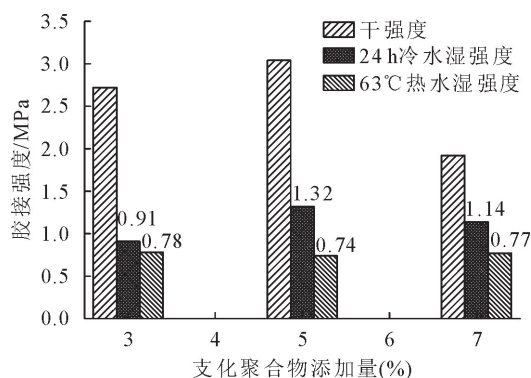


图4 支化聚合物类型Ⅱ饼粕复合体系3层板胶接强度

Fig. 4 The bonding strength of three-ply wood produced with mixture of branched polymer and type II walnut meal

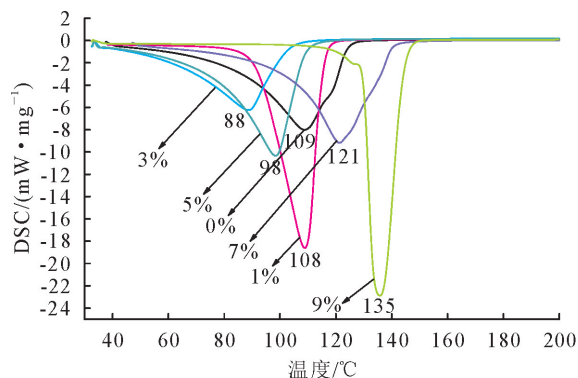


图5 核桃饼粕与支化聚合物复合体系的固化特征

Fig. 5 The curing characteristics of walnut meal and branched polymer hybrid system

## 2.4 复合体系的 FT-IR 分析

为了解不同支化聚合物添加比例对复合体系胶接强度变化的影响,利用 FT-IR 分析方法对不同状

态体系下的结构组成进行了测试,结果见图6。对比图6中不同区域曲线的变化特征可以发现,相对于热解液而言,交联固化后体系的峰值分布更加丰富,而相对于支化聚合物来讲,固化交联后体系中峰值的分布比例在急剧减少,这说明支化聚合物与核桃饼粕预处理液之间产生了化学层面的结合。经过文献<sup>[9-12]</sup>对比分析, $3\,000\sim 3\,500\text{ cm}^{-1}$ 范围内主要与 N—H 或 O—H 的伸缩振动有关,在 $2\,750\sim 3\,000\text{ cm}^{-1}$ 主要与 $-\text{CH}_2$ 、 $\text{C}=\text{O}$ 的伸缩振动有关,在 $1\,500\sim 1\,750\text{ cm}^{-1}$ 主要与 N—H 的弯曲振动或 C—O 的伸缩振动有关, $1\,000\sim 1\,500\text{ cm}^{-1}$ 的峰值主要源于 C—H、C—O 的伸缩振动,在 $500\sim 750\text{ cm}^{-1}$ 主要与 N—H 的面外变形弯曲振动有关。由此可知支化聚合物主要是以碳链为主的支化端氨基聚合产物,分子中存在大量的活性氨基( $-\text{NH}_2$ )、亚氨基( $-\text{NH}$ )等活性基团。而经过预处理后的核桃饼粕液产物中主要以氨基( $-\text{NH}_2$ )、羟基( $-\text{OH}$ )、羧基( $-\text{COOH}$ )等活性基团的组成为主,也表明经过热处理后蛋白质的 I 级结构发生水解,为化学交联提供了条件。结合图6中样品峰值的变化,支化聚合物对核桃饼粕的交联改性主要通过氨基与羧基之间的化学交联反应或氨基之间的脱氨化反应产生内聚结合强度,可以看到在样品 C 中还残留有一部分氨基等活性基团,在压板过程中借助热量,可以与木材表面之间的基团形成一定的交联和结合,从而表现出优异的胶接强度。

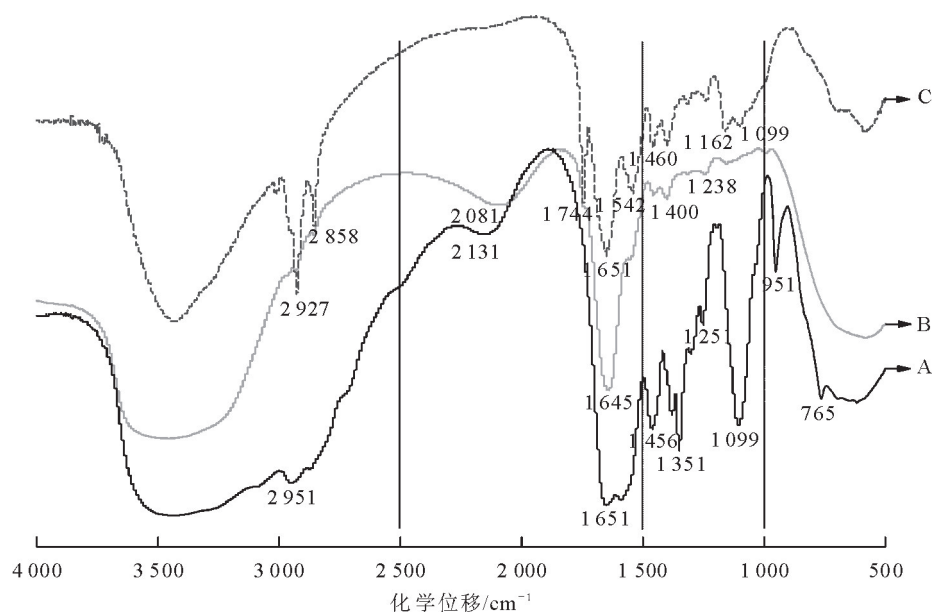
## 2.5 复合体系的 SEM 分析

未经处理的核桃饼粕粉微观结构基本呈独立的颗粒状,表面相对平整、光滑(图7)。而经过热处理后,随着体系中蛋白质结构的降解和解离,不再呈现完整的颗粒状结构,可以看出粉粒的结构慢慢被改变,不同粉粒之间形成了连续的体系,其结构变得紧凑起来,可能主要依靠蛋白质之间的物理键形成的连接。而当加入3%比例的支化聚合物之后,交联体系的结构表现为层状堆叠状,支化聚合物与核桃饼粕之间形成了连续的体系,相较于热处理产物,体系具有更好的致密性和结合度,从而赋予体系更好的耐水性能和胶接强度,也进一步佐证了支化聚合物与核桃饼粕体系之间的交联反应。

## 3 结论与讨论

### 3.1 结论

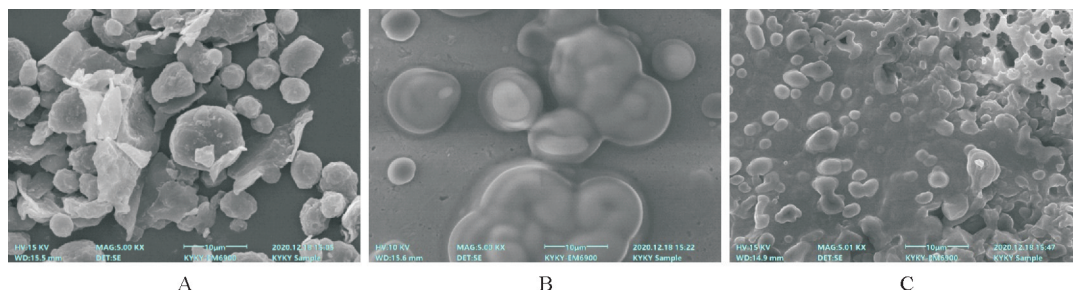
以核桃饼粕为原料,支化聚合物为交联改性剂的复合体系作为木材胶接用胶黏剂,胶接强度不仅与核桃饼粕中蛋白质和油脂的含量有关,支化聚合物的添加量对耐水胶接强度有显著影响,通过比较



注:A. 支化聚合物;B. 核桃饼粕预处理液;C. 3%比例支化聚合物与核桃饼粕预处理液复合体系。

图6 复合体系的 FT-IR 测试

Fig. 6 The FT-IR spectra



注:A. 未经处理的核桃饼粕粉末;B. 经过热处理的核桃饼粕粉;C. 经过支化聚合物改性后体系的固化产物。

图7 样品的 SEM 测试

Fig. 7 SEM morphology of samples

认为,支化聚合物添加量在 3%~5% 条件下,复合体系更容易在较低能量条件下形成交联反应,对应于 DSC 测试结果中具有更低的固化峰值温度,此时体系综合性能呈现最佳,应用于 3 层胶合板的胶接,结果可以满足 II 类胶合板的性能要求。

FT-IR 分析表明,支化聚合物中的活性氨基基团与核桃饼粕中的羧基之间可以形成化学交联反应,从固化后交联体系的 SEM 形貌特征变化上进一步佐证了支化聚合物与核桃饼粕之间交联反应的发生,对体系胶接耐水强度的提升具有重要作用。

### 3.2 讨论

木材胶接用绿色环保胶黏剂的开发是产业发展的必然趋势,而以生物质原料为主的胶黏剂的研发不仅可以提升生物质原料的利用价值,对于建立优质室内环境也具有重要作用。本试验发现,核桃饼粕作为高蛋白含量的一种加工副产物,用于蛋白类胶黏剂的合成原料,具有良好的发展潜力。虽然,支

化聚合物改性后的核桃饼粕复合体系具有绿色、环保、优异胶接性能等特征,但也存在一定的局限,比如耐热水性能还相对较低、树脂体系整体成本的控制有待进一步优化改进、原料防霉防腐性的控制有待提升等。将在后期的研究中加以考虑和分析。

### 参考文献:

- [1] 马玉峰,龚轩昂,王春鹏. 木材胶黏剂研究进展[J]. 林产化学与工业, 2020, 40(2): 1-15.  
MA Y F, GONG X A, WANG C P. Research progress in wood adhesives[J]. Chemistry and Industry of Forest Products, 2020, 40(2): 1-15. (in Chinese)
- [2] 孙丰文, 闵德秀, 孙恩惠, 等. 豆粕粉制备胶合板用生物质胶黏剂的研究[J]. 大豆科学, 2016, 35(2): 301-305.  
SUN F W, MIN D X, SUN E H, et al. Preparation of bio-adhesive based on soya bean meal for plywood[J]. Soybean Science, 2016, 35(2): 301-305. (in Chinese)
- [3] 邵卓峰, 孙亚东, 富尔雅. 室内装饰胶合板用改性淀粉胶黏剂的制备及应用[J]. 东北林业大学学报, 2020, 48(12): 118-123.

- SHAO Z F, SUN Y D, FU E Y. Preparation and application of modified starch adhesive for indoor plywood[J]. Journal of Northeast Forestry University, 2020, 48(12): 118-123. (in Chinese)
- [4] ARACRI E, BLANCO C, TZANOY T. An enzymatic approach to develop a lignin based adhesive for wool floor coverings[J]. Green Chemistry, 2014, 16(5): 2597-2603.
- [5] LEE C J, CHANG T C, CHUNG M J. Effects of gluing conditions for formaldehyde-free tannin adhesive on the oriented bamboo scrimber board properties[J]. European Journal of Wood and Wood Products, 2021, 79: 1623-1631, 1-9.
- [6] 韩海涛, 宴正明, 张润光, 等. 核桃蛋白组分的营养价值、功能特性及抗氧化性研究[J]. 中国油脂, 2019, 44(4): 29-34.
- HAN H T, YAN Z M, ZHANG R G, *et al.* Nutritional value, functional characteristics and antioxidant activities of fractions in walnut protein[J]. China Oils and Fats, 2019, 44(4): 29-34. (in Chinese)
- [7] 冯贞, 方晓璞. 核桃加工副产物综合利用途径[J]. 中国油脂, 2018, 43(9): 71-74, 87.
- FENG Z, FANG X P. Comprehensive utilization ways of by-products from walnut processing[J]. China Oils and Fats, 2018, 43(9): 71-74, 87. (in Chinese)
- [8] 金子纯, 张润光, 韩军岐, 等. 核桃饼粕蛋白质及其开发利用[J]. 食品与发酵工业, 2016, 42(6): 265-270.
- JIN Z C, ZHANG R G, HAN J Q, *et al.* Development and utilization of walnut meal protein[J]. Food and Fermentation Industries, 2016, 42(6): 265-270. (in Chinese)
- [9] 王凤, 王辉, 杜官本. 聚乙烯亚胺改性尿素-乙二醛聚合物树脂性能研究[J]. 西北林学院学报, 2020, 35(4): 218-222.
- WANG F, WANG H, DU G B. Performance of urea-glyoxal resin modified with poly ethylenimine[J]. Journal of Northwest Forestry University, 2020, 35(4): 218-222. (in Chinese)
- [10] 王冬梅, 曹金丽, 张怡, 等. 红外光谱法研究聚乙烯亚胺的结构[J]. 光谱学与光谱分析, 2016, 36(10): 199-200.
- WANG D M, CAO J L, ZHANG Y, *et al.* The structure characterization of polyethylenimine via FT-IR[J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2016, 36(10): 199-200. (in Chinese)
- [11] 吴志刚, 张本刚, 张俊, 等. 环保型麻风树种子蛋白胶黏剂的制备及机理研究[J]. 西北林学院学报, 2018, 33(6): 223-230.
- WU Z G, ZHANG B G, ZHANG J, *et al.* Preparation and mechanism of an eco-friendly *Jatropha curcas* protein-based adhesive[J]. Journal of Northwest Forestry University, 2018, 33(6): 223-230. (in Chinese)
- [12] 张泽宇, 朱慧芸, 庞久寅. 丙烯酸酯改性大豆蛋白制备胶黏剂[J]. 北华大学学报: 自然科学版, 2020, 21(4): 552-555.
- ZHANG Z Y, ZHU H Y, PANG J Y. Plywood prepared with soybean protein modified by acrylate[J]. Journal of Beihua University: Natural Science, 2020, 21(4): 552-555. (in Chinese)

#### (上接第 173 页)

- [15] 马骏, 李昌晓, 魏虹, 等. 三峡库区生态脆弱性评价[J]. 生态学报, 2015, 35(21): 7117-7129.
- MA J, LI C X, WEI H, *et al.* Dynamic evaluation of ecological vulnerability in the Three Gorges Reservoir region in Chongqing municipality, China[J]. Acta Ecologica Sinica, 2015, 35(21): 7117-7129. (in Chinese)
- [16] 王莲芳, 许树柏. 层次分析法引论[M]. 北京: 中国人民大学出版社, 1990.
- [17] 武文丽, 黄春波, 付宗驰, 等. 干旱区绿地适宜性评价研究—以新疆北屯市为例[J]. 西北林学院学报, 2018, 33(5): 236-244.
- WU W L, HUANG C B, FU Z C, *et al.* Green space suitability evaluation in arid area: a case study of Beitun City, Xinjiang[J]. Journal of Northwest Forestry University, 2018, 33(5): 236-244. (in Chinese)
- [18] 诸葛海锦, 李晓文, 张翔, 等. 青藏高原高寒荒漠区藏羚适宜生境识别及其保护状况评估[J]. 应用生态学报, 2014, 25(12): 3483-3490.
- [19] 翟瑞, 黄佑超, 赵超超, 等. 基于水文分析的动物通道选址—以龙栖山自然保护区为例[J]. 西北林学院学报, 2020, 35(3): 191-196.
- ZHAI R, HUANG Y C, ZHAO C C, *et al.* Location selection of wildlife corridors based on hydrological analysis: a case study of the Longqi Mountain nature reserve[J]. Journal of Northwest Forestry University, 2020, 35(3): 191-196. (in Chinese)
- [20] 张洪峰, 胡罕, 苏丽娜, 等. 青海三江源自然保护区马麝栖息地适宜性评价[J]. 西北农业学报, 2017, 26(8): 1141-1147.
- ZHANG H F, HU H, SU L N, *et al.* Habitat suitability assessment of musk deer (*Moschus sifanicus*) in Sanjiangyuan nature reserve, Qinghai Province[J]. Acta Agriculturae Boreali-occidentalis Sinica, 2017, 26(8): 1141-1147. (in Chinese)
- [21] BROWN S K, BUJA K R, JURY S H, *et al.* Habitat suitability index models for eight fish and invertebrate species in Casco and Sheepscot Bays, Maine[J]. North American Journal of Fisheries Management, 2000, 20(2): 408-435.
- [22] 王劲峰, 徐成东. 地理探测器: 原理与展望[J]. 地理学报, 2017, 72(1): 116-134.
- [23] WANG J F, LI X H, CHRISTAKOS G, *et al.* Geographical detectors-based health risk assessment and its application in the neural tube defects study of the Heshun Region, China[J]. International Journal of Geographical Information Science, 2010, 24(1/2): 107-127.
- [24] 吕晨, 蓝修婷, 孙威. 地理探测器方法下北京市人口空间格局变化与自然因素的关系研究[J]. 自然资源学报, 2017, 32(8): 1385-1397.
- LÜ C, LAN X T, SUN W. A study on the relationship between natural factors and population distribution in Beijing using geographical detector[J]. Journal of Natural Resources, 2017, 32(8): 1385-1397. (in Chinese)
- [25] 朱琪, 周旺明, 贾翔, 等. 长白山国家自然保护区及其周边地区生态脆弱性评估[J]. 应用生态学报, 2019, 30(5): 1633-1641.
- ZHU Q, ZHOU W M, JIA X, *et al.* Ecological vulnerability assessment on Changbai Mountain national nature reserve and its surrounding areas, northeast China[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2019, 30(5): 1633-1641. (in Chinese)