

漆酶介体体系对纸模材料强度与疏水性的影响

陆新宗, 肖生苓, 王全亮, 唐杰
(东北林业大学 工程技术学院, 哈尔滨 150040)

摘要: **目的** 利用漆酶介体体系对杨木 CTMP 浆进行生物酶处理, 研究优化后的漆酶介体体系对纸浆模塑包装材料强度和表面疏水性能的影响。**方法** 利用正交试验方法和红外光谱以及扫描电镜等手段, 分析拉伸强度、接触角、纤维表面木素结构、纤维表面形貌等的变化。**结果** 漆酶介体体系处理杨木浆的最优方案为 $A_2B_1C_4D_3E_2$, 最优反应条件为漆酶用量 1.68 g, 介体 0.2% (均相对绝干浆), pH 值为 6, 反应温度为 60 ℃, 反应时间为 90 min, 通空气。**结论** 在此条件下采用漆酶介体体系处理杨木 CTMP 浆, 纸浆中残余木素在漆酶处理过程中部分会被氧化降解, 使纤维间粘结作用得到增强, 纸浆模塑包装材料的强度与疏水性得到提高。

关键词: 漆酶; 介体; 拉伸强度; 疏水; 纸浆模塑; 包装材料

中图分类号: TB484; TS71 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3563(2018)11-0081-07

DOI: 10.19554/j.cnki.1001-3563.2018.11.015

Effects of Laccase Mediator System on the Strength and Hydrophobicity of Pulp Molded Materials

LU Xin-zong, XIAO Sheng-ling, WANG Quan-liang, TANG Jie
(Engineering and Technology of Northeast Forestry University College, Harbin 150040, China)

ABSTRACT: The work aims to study the effect of optimized laccase mediator system (LMS) on the strength and surface hydrophobicity of the pulp molded packaging material with LMS used to treat poplar CTMP pulp. The change in tensile strength, contact angle, fiber surface lignin structure and fiber surface topography, etc. was analyzed by means of orthogonal test, infrared spectrum analysis and scanning electron microscope. The best way to treat poplar pulp with laccase mediator system was $A_2B_1C_4D_3E_2$. The best reaction conditions were: 1.68 g of pulp; 6 of pH, 60 ℃ of reaction temperature, and 90 min of reaction time by constant air introduction. When poplar CTMP pulp is treated by LMS under such conditions, part of residual lignin in the pulp is oxidized, bonding between fiber and fiber is strengthened, and the tensile strength and hydrophobic property of pulp molded packaging materials are improved.

KEY WORDS: laccase; mediator; tensile strength; hydrophobic; pulp molded; packaging materials

纸浆模塑制品是用于包容和限制被包装物的固形包装件, 是近几年发展迅猛的新型包装制品。由于纸浆模塑包装材料绿色环保, 具有适宜的强度、优良的缓冲性能, 且具有材质轻、透气性好等优点, 是实木包装材料的优良替代品, 目前广泛应用于电子产品、轻工产品、医疗器具等的缓冲包装^[1]。

为了保证在运输和搬运过程中模塑包装制品能够保护包装物不被损坏, 要求其具有良好的抗挤压和

抗冲击能力, 因此, 纸浆模塑材料必须具有足够的强度、成型刚性和稳定性。由于羟基和酚羟基广泛地分布在纸浆模塑纤维材料表面, 使其具有较强的吸水性, 在潮湿环境条件下极易吸水软化, 使包装材料强度下降, 易损坏内装物^[2]。王俊丽^[3]等研究了含水率对瓦楞纸箱力学性能的影响, 发现含水率为 16.4% 时, 瓦楞纸箱的边压强度、抗压强度下降幅度在 42.6%~52% 左右。张岩^[4]等研究表明, 湿度对纸浆模

收稿日期: 2018-02-28

基金项目: 国家重点研发计划 (2017YFD0601004)。

作者简介: 陆新宗 (1992—), 男, 东北林业大学硕士生, 主攻包装材料。

通信作者: 肖生苓 (1961—), 博士, 东北林业大学教授, 主要研究方向为农林生物质材料利用。

塑材料的缓冲性能、弹性模量以及屈曲临界应力等均具有显著影响,相对湿度为 90%时,第二屈曲临界应力下降 42%,缓冲性能明显下降。邵珍珠^[5]等研究结果表明,当相对湿度高于 50%时,制品的静态抗压性能随湿度的升高而下降。

目前,降低纸浆模塑材料疏水性的方法有表面涂覆、纤维接枝改性等方法。Seydel^[6]等在纸页上涂覆了一层氰化甘油三酯,使得纸页在表面形成了一层疏水薄膜,从而改善了纸页的疏水性。在纤维改性方面,Chmielewski^[7]等将改性后的纤维素纤维用于抗吸入复合材料的合成,从而获得疏水性复合材料。Li Hui^[8]等利用层合结构,使得在纤维素表面形成一种多层的疏水性结构。虽然采用上述物理化学方法能够获得适度疏水的效果,但是这些方法在后期处理过程中均存在污染问题,并且会额外损耗能源,不符合我国节能减排,绿色发展的宗旨。

漆酶作为一种木素降解酶以及含酮的多酚氧化酶,在某些具有传递电子能力的介体与氧气的存在下,能够对酚类、芳香类和脂肪性的胺类物质等进行催化氧化^[9]。漆酶还可以氧化一些小分子化合物,使得这些小分子化合物具有一定的稳定性和较高的氧化还原电势,这些小分子化合物被称为介体,其与漆酶共同作用的体系称为漆酶介体体系^[10]。目前对漆酶的研究主要集中在改善纸张强度以及疏水性、改善纸浆的可漂性、生物制浆、处理造纸废水等方面。漆酶在疏水性改善方面,由于其能耗小,氧化产物只有水,对环境污染较轻,是今后的发展方向,国内外学者在这方面也做了很多有益尝试。Reynaud 等^[11]利用漆酶与没食子酸月桂酯接枝改性高木素含量的硫酸盐浆,使得材料的疏水性提升了 2 倍以上。Thakur 等^[12]则利用漆酶将阿魏酸接枝于高木素含量的木纤维,使得改性纤维同时具有较高的疏水性和抗菌性。

文中以杨木剩余物木片为原料,以漆酶介体体系为改性剂,制备纸浆模塑包装材料。研究漆酶介体体系对纸浆模塑包装材料强度与疏水性能的影响,并结合对木素结构以及纸浆模塑包装材料微观结构的分析,深入研究漆酶介体体系对纸浆模塑包装材料拉伸强度与疏水性的影响。

1 实验

1.1 材料与试剂

材料:浆料,未漂杨木化学热磨机械浆(CTMP),打浆度 45°SR;漆酶,博美生物科技有限公司,商品名 NS51003。

试剂:介体,ABTS[2,2-连氮基-双-(3-乙基苯并二氢噻唑啉-6-磺酸)],博美生物科技有限公司。

1.2 仪器与设备

仪器和设备:ZPS-300 型盘磨机,吉林市路铭造纸机械有限公司;ZT7-01 纸样成型器,兴平市中通试验装备有限公司;101-3A 型电热鼓风干燥箱,天津市泰斯特仪器有限公司;JJ-1 型精密电动增力搅拌机,常州市华普达教学仪器有限公司;电热恒温水浴锅,天津市泰斯特仪器有限公司;pHS-3C 型台式数显精密酸度计,上海圣科仪器设备有限公司;静滴接触角/界面张力测量仪,德国克里士公司;红外光谱分析仪(FIR)德国 INSION 公司;Quanta 200 型扫描电子显微镜(SEM),荷兰 FEI 公司。

1.3 方法

1) 正交试验设计。根据前期预实验研究结果,以漆酶用量、pH 值、温度、时间和介体的质量分数为影响因素,以强度和表面疏水性为纸浆模塑包装材料的指标,设计正交试验,并分析各因素对纸浆模塑包装材料的强度和表面疏水性的影响。确定漆酶介体体系最优方案的正交试验因素与水平设计见表 1 和表 2。

表 1 正交试验因素与水平
Tab.1 Orthogonal test factor and level

水平	因素				
	漆酶用量/g	pH	温度/℃	时间/min	介体的质量分数/%
1	0	3.6	10	30	0
2	1.68	4.5	25	60	0.2
3	3.27	6	40	90	0.4
4	4.95	7	60	120	0.6

2) 拉伸强度测定。热压成型的纸浆模塑材料,按照 GB/T 450—2008^[13]取样,按照 GB/T 12914—2008^[14]进行试验。

3) 疏水性测定。采用 JC2000CI 静滴接触角/界面张力测量仪^[15]进行接触角测定。若接触角小于 90°,则判定为亲水材料;若接触角大于 90°,则为疏水材料;接触角大于 150°,为超疏水材料。

4) 纤维表面木素结构分析。利用锋利的刀片从试样表面刮取一层粉末(80 目)约 2 mg,与 200 mg 溴化钾粉末(80 目)一起置于玛瑙研钵中充分混合并研磨,分散均匀,然后将粉末装入压片模具内压制透明或半透明薄片,置于红外光谱扫描仪(FIR)上进行光谱分析,扫描范围为 4000~600 cm⁻¹。

5) 纤维形貌分析。将纸浆模塑包装材料裁切成 40 mm×10 mm×4 mm 的样条,用锋利的刀片裁切出横断面,用镊子将样条剥开以露出层间断面,然后置于真空干燥器中干燥 48 h 后,经过真空镀金,置于 Quanta 200 型扫描电子显微镜(SEM)上对纤维表面形貌与层间断面形貌进行分析,加速电压为 20 kV。

表 2 介体体系正交试验设计
Tab.2 Orthogonal test design for mediator system

实验号	漆酶用量/g	漆酶用量/(U·g ⁻¹)	pH	温度/℃	时间/min	介体的质量分数/%
	<i>A</i>	<i>A</i>	<i>B</i>	<i>C</i>	<i>D</i>	<i>E</i>
1 (对照)	0	0	3.6	10	30	0
2	0	0	4.5	25	60	0.2
3	0	0	6	40	90	0.4
4	0	0	7	60	120	0.6
5	1.68	8	3.6	25	90	0.6
6	1.68	8	4.5	10	120	0.4
7	1.68	8	6	60	30	0.2
8	1.68	8	7	40	60	0
9	3.27	16	3.6	40	120	0.2
10	3.27	16	4.5	60	90	0
11	3.27	16	6	10	60	0.6
12	3.27	16	7	25	30	0.4
13	4.95	24	3.6	60	60	0.4
14	4.95	24	4.5	40	30	0.6
15	4.95	24	6	25	120	0
16	4.95	24	7	10	90	0.2

2 结果与讨论

2.1 介体体系最优组合方案确定

根据表 2 设计，共进行 16 组试验，每一组试验分别进行了强度和疏水性的测定。对于强度和疏水性均进行了 5 次测定，取均值后得到试验结果，见表 3。在结果分析中采用直观分析法对 2 个指标进行分析，见表 4 和表 5。影响因素对目标影响的主次顺序见表 4。

表 3 纸浆模塑材料强度与疏水性
Tab.3 Strength and hydrophobicity of pulp molded materials

实验号	实验指标	
	强度/MPa	接触角/(°)
1	59.51	73.39
2	68.59	68.91
3	64.34	76.58
4	66.46	73.80
5	73.72	78.25
6	74.92	82.25
7	75.71	83.66
8	80.20	72.75
9	77.52	88.65
10	52.64	84.83
11	58.57	75.14
12	61.45	77.34
13	66.49	93.43
14	45.66	88.90
15	53.94	87.24
16	57.69	92.67

极差值反映了各因素对试验结果的影响程度，极差值越大对试验结果的影响就越大，极差值越小对试验结果的影响就越小。由表 4 和表 5 所得极差值可以确定各因素对 2 个指标影响的主次顺序，见表 6。

2.1.1 各因素优化水平的确定

各因素优化水平是根据表 4 和表 5 中的 $\bar{K}_j$ 值大小确定。取平均值 $\bar{K}_j$ 较大的因素水平作为优化后的水平，各因素优化水平组合见表 7。

表 4 纸浆模塑包装材料强度与漆酶介体体系各因素
影响关系直观分析
Tab.4 Intuitive analysis of the influence relationship between the strength of pulp molded packaging material and the factors of laccase mediator system

参数	<i>A</i>	<i>B</i>	<i>C</i>	<i>D</i>	<i>E</i>
K_1	258.90	238.30	250.69	231.61	225.77
K_2	273.31	241.81	257.70	253.33	239.23
K_3	220.62	248.47	217.64	248.39	267.20
K_4	223.78	245.28	250.58	243.28	244.41
$\bar{K}_1$	64.725	69.310	62.672	60.583	61.573
$\bar{K}_2$	76.137	60.452	64.425	68.463	69.877
$\bar{K}_3$	62.545	63.140	66.930	62.097	66.800
$\bar{K}_4$	55.945	66.450	65.325	68.210	61.102
极差 <i>R</i>	20.192	8.858	4.258	7.880	8.775

注： K_j 为每个因素同一水平得到的实验结果之和； $\bar{K}_j$ 为每个因素同一水平试验结果的平均值； j 为因素水平数，取值范围为 1~4

表 5 纸浆模塑包装材料疏水性与漆酶介体体系
各因素影响关系直观分析

Tab.5 Intuitive analysis of the influence relationship between the hydrophobicity of pulp molded packaging materials and the factors of laccase mediator system

参数	A	B	C	D	E
K_1	292.70	333.70	323.50	323.30	318.20
K_2	316.90	324.90	311.70	310.20	333.90
K_3	326.00	322.60	326.90	332.30	329.60
K_4	362.20	316.60	335.70	331.90	316.10
$\bar{K}_1$	73.170	83.430	80.862	80.823	79.552
$\bar{K}_2$	79.227	81.222	77.935	77.558	83.472
$\bar{K}_3$	81.490	80.655	81.720	83.082	82.400
$\bar{K}_4$	90.560	79.140	83.930	82.985	79.023
极差 R	17.390	4.290	5.995	5.524	4.449

注: K_j 为每个因素同一水平得到的实验结果之和; $\bar{K}_j$ 为每个因素同一水平试验结果的平均值; j 为因素水平数, 取值范围为 1~4

表 6 影响因素主次顺序

Tab.6 Primary and secondary order of influence factors

实验目标	主次顺序
拉伸强度	$A > B > E > D > C$
接触角	$A > C > D > E > B$

表 7 各影响因素的优化水平组合

Tab.7 Optimization level combination of various influence factors

实验目标	优良组合
拉伸强度	$A_2 > B_1 > E_2 > D_2 > C_3$
接触角	$A_4 > C_4 > D_3 > E_2 > B_1$

注: A_j-E_j 为 5 个因素; j 为因素的水平数, 取值范围 1~4

2.1.2 最佳因素水平的确定

由于拉伸强度和接触角的优化条件不一致, 必须根据因素的主次顺序 (见表 7) 综合考虑, 因此试验通过综合平衡法来确定最佳因素水平。

对于漆酶因素 A, 其对拉伸强度的影响排第 1 位, 此时取 A_2 ; 其对接触角影响也排第 1 位, 取 A_4 。若取 A_2 , 拉伸强度比取 A_4 时增加了 36.1%, 而接触角降低了 14.3%。综合考虑 A_2 较好。

对于 pH 值因素 B, 其对拉伸强度的影响排第 2 位, 此时取 B_1 ; 其对接触角的影响排第 5 位, 同样取 B_1 。2 种指标对因素 B 的水平数要求一致, 因此因素 B 选 B_1 。

对于温度因素 C, 其对拉伸强度的影响排第 5 位, 此时取 C_2 ; 其对接触角的影响排第 2 位, 此时为 C_4 。若取 C_4 , 拉伸强度相比取 C_2 时提高了 1.4%, 提高并

不明显, 而对于接触角则提高了 7.7%, 因此应重点考虑接触角这一指标的因素水平, 故 C 因素为 C_2 。

对于时间因素 D, 其对拉伸强度的影响排第 4 位, 取 D_2 较好; 其对接触角的影响排第 3 位, 取 D_3 较好。同理, 若取 D_2 , 拉伸强度相比取 D_3 时能够提高 10.3%, 考虑到接触角提高程度为 7.1%, 因素 D 对强度的影响要大于对接触角的影响, 因此 D 因素选取 D_2 。

对于介体因素 E, 其对拉伸强度的影响大小排在第 3 位, 此时选 E_2 较好; 其对接触角的影响排第 4 位, 取 E_2 较好。因素 E 对 2 种指标的影响相同, 故 E 因素选取 E_2 。

通过综合平衡确定试验的最优组合为 $A_2B_1C_4D_2E_2$ 。

2.2 优化后漆酶介体体系对纸浆模塑包装材料强度与疏水性能的影响

2.2.1 验证性实验结果

为确定最优方案的有效性, 进行了 3 次验证性实验, 实验结果取平均值。按照表 8 中的实验方案制备纸浆模塑包装材料, A1 为未经漆酶改性的对照试样, A2 为优化后漆酶介体体系改性试样, 并对其进行抗张强度和接触角的测定, 其结果见表 8。

表 8 验证性实验方案及结果

Tab.8 Confirmatory experiment scheme and result

实验号	A	B	C	D	E	接触角/ (°)	拉伸强度/ MPa
A1	—	B_1	C_4	D_2	—	68.91	59.51
A2	A_2	B_1	C_4	D_2	E_2	96.16	82.39

由表 8 结果可知, 由最优方案得到的纸浆模塑材料的接触角大于 90° , 属于疏水性材料; 其拉伸强度也高于对照试样的强度, 并且其强度提高了 38.4%。由此可以确定该实验的最优方案具有可靠性与可行性。

2.2.2 纸浆模塑包装材料纤维表面木素结构分析

漆酶在介体辅助作用下能够增强其氧化性, 可以对植物细胞壁中的有机物进行氧化, 如木质素、邻位和对位酚、氨基酸、茶多酚等有机物红外一些无机离子^[16]。为探究经漆酶介体体系处理后杨木纸浆模塑材料木素结构发生的变化, 对最优方案以及对对照样进行红外扫描, 观察其变化情况, 见图 1 和表 9^[17-18]。

羟基的吸收峰通常在 $3200\sim 3650\text{cm}^{-1}$ 范围内, 羟基可形成分子间或分子内氢键。由图 1 可知, 3337cm^{-1} 处有羟基吸收峰, 峰形宽而钝, 且位于较低的波数, 可知羟基在分子间发生缔合, 形成以氢键相连的多聚体。由表 9 可知, 羟基的相对吸收强度增强, 分子间的氢键增多, 这也是纸浆模塑材料拉伸强

度增加的原因之一。

C—H 峰值在 3000 cm^{-1} ，由图 1 可知，C—H 峰值小于 3000 cm^{-1} ，为饱和碳（除三元环外）的碳氢振动产生的吸收峰，而饱和碳的碳氢振动的常见 4 个吸收峰为 $2960, 2870, 2925, 2850\text{ cm}^{-1}$ 。吸收位置向波数较低的位置移动，可以判定 CH_3 或 CH_2 与氧原子相连。由表 9 可知，C—H 吸收峰的相对吸收强度有所增强，可以断定有有机物产生，这可能是木素分子结构断裂，侧链结构增加导致。

在 $1423, 1508, 1319\text{ cm}^{-1}$ 处为杨木木素的特征吸收峰^[19]。由图 1 和表 7 可知，其峰值都有所减弱，而相对吸收强度增加。这说明在经过漆酶处理后，木素部分氧化降解，侧链 β 羟基经过氧化生成 β 羰基。在 $1032, 1319\text{ cm}^{-1}$ 以及 1594 cm^{-1} 处的吸收峰的相对吸收强度增加，说明木素经氧化后有羰基的产生。羰基

在木素有机物中是属于疏水性基团，因此纸浆模塑材料的疏水性得到了提高^[20]。

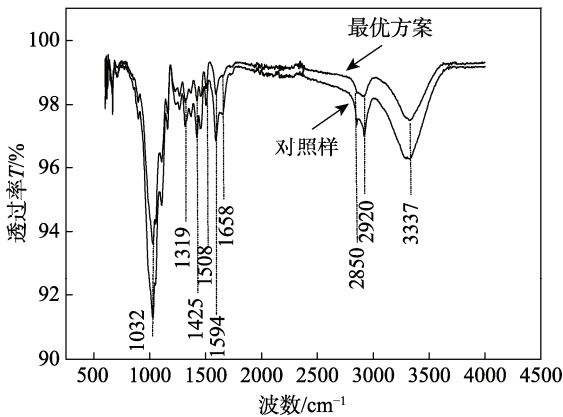


图 1 纸浆模塑材料的红外光谱
Fig.1 Infrared spectra of pulp molded material

表 9 木素红外光谱特征吸收峰及其相对吸收强度
Tab.9 Characteristic absorption peak and relative absorption intensity of lignin infrared spectra

波数/ cm^{-1}		相应官能团吸收峰	相对吸收强度	
对照样	LMS 处理样		对照样	最优方案
3337	3337	羟基 O—H 伸缩振动吸收峰	0.98	0.99
2920	2920	甲基、亚甲基 C—H 伸缩振动吸收峰	0.99	1.00
1735	1735	非共轭的酮，羰基和脂羰基伸缩振动吸收峰	1.01	1.01
1658	1658	共轭 C=O 伸缩振动吸收峰	1.00	1.00
1594	1594	苯环骨架振动，C=O 伸缩振动吸收峰	0.99	1.00
1508	1508	苯环骨架振动吸收峰	1.00	1.00
1456	1456	C—H，非对称振动吸收峰	0.99	1.00
1423	1423	苯环振动，C—H 平面变形	0.99	1.00
1319	1319	苯环骨架振动，紫丁香型、缩聚型愈创木基	0.99	1.00
1267	1267	苯环骨架振动，愈创木基型，C=O 伸缩振动吸收峰	1.00	1.00
1227	1227	C—C，C—O，C=O 伸缩振动吸收峰	1.00	1.00
1106	1106	C—H 苯环，紫丁香型	0.97	0.98
1032	1032	芳环 C—H，伯醇 C—O 振动，C=O 伸缩振动吸收峰	0.93	0.95
897	897	C—H，苯环平面外的弯曲	1.00	1.00

注：相对吸收强度是指各吸收峰与 1508 cm^{-1} 处苯环骨架振动吸收峰的强度之比

2.2.3 纸浆模塑包装材料纤维表面形貌分析

研究表明，漆酶对木素的活化可使纤维之间产生自粘合，有利于提高纸浆模塑材料的结合强度^[21]。纸浆模塑材料在热压成型过程中，纤维分子链主价键通常比副价键高得多，所以纸浆模塑材料在受到拉伸破坏时，主要是纤维之间的交错拉伸^[22—24]。该实验所得最优方案的拉伸强度与对照样相比提高了 40.9%。利用扫描电子显微镜（SEM）对纸浆模塑材料的纤维表面与层间断面进行形态分析，了解纤维表面以及纤维与纤维之间的结合情况。漆酶介体体系处理前后纸浆模塑包装材料纤维表面的 SEM 图见图 2。

由图 2 可知，空白样的纤维与纤维之间只是简单地搭接在一起，而漆酶介体体系处理后的最优方案

中，纤维与纤维之间搭接紧密，几乎看不到纤维之间的链接，在纤维与纤维之间存在胶粘性物质，使得纤维之间粘结作用增强。这说明，漆酶对纤维表面进行的改性，使得纤维之间的联接增强，因此提高了纸浆模塑材料的拉伸强度。漆酶介体体系处理前后纸浆模塑包装材料层间断面纤维的 SEM 图见图 3。

由图 3 同样可见，未经漆酶处理的纸浆模塑材料对照样的断面，纤维与纤维之间搭接并不紧密，能够清晰地看到纤维与纤维之间的缝隙，纤维的接触面积较少；而漆酶介体体系处理后的最优方案中，其断面纤维与纤维之间搭接非常紧密，纤维之间几乎看不到缝隙，这是由于经漆酶处理后的纤维之间产生了自粘合作用，纤维间的接触面积大大增加，使纸浆模塑纤维材料的强度得到提高。

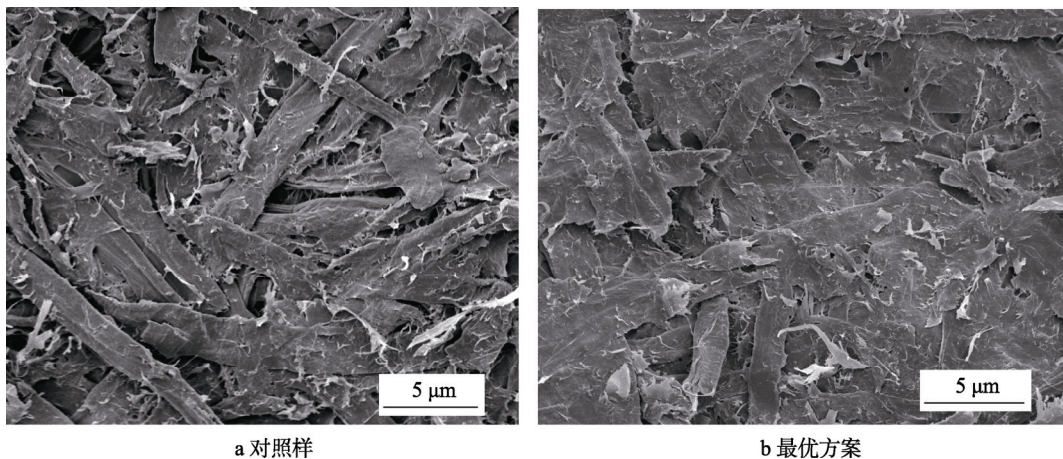


图2 纸浆模塑包装材料纤维表面形态

Fig.2 Fiber surface morphology of pulp molded packaging materials

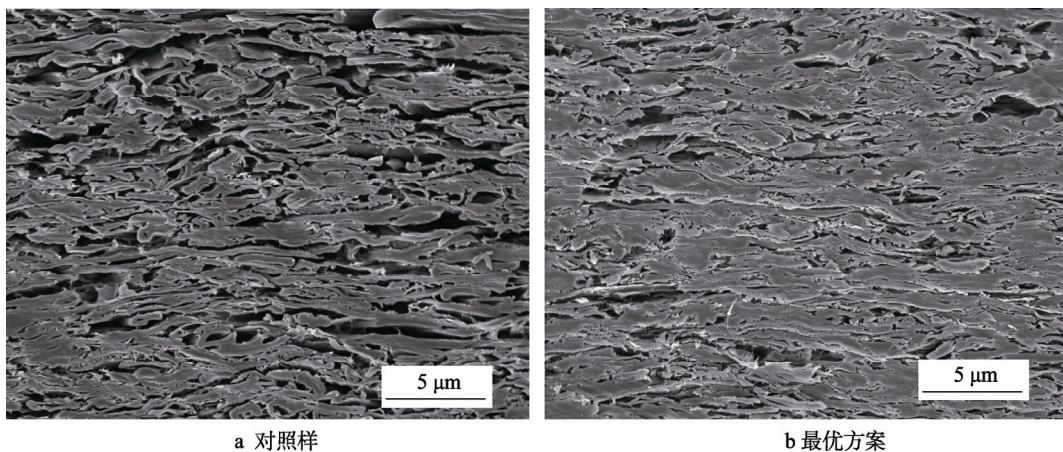


图3 纸浆模塑包装材料层间断面纤维形态

Fig.3 Interlayer section fiber morphology of pulp molded packaging materials

3 结语

在适宜的条件下,漆酶介体体系对浆料进行处理,能够有效改善纸浆模塑包装材料的强度和疏水性。

通过正交试验综合平衡法确定了漆酶介体体系处理浆料的最佳实验条件组合为漆酶用量 1.68 g,介体用量 0.2%,pH 值 6.0,温度 60 ℃,处理时间 60 min,通空气。在此条件下,纸浆模塑包装材料的强度为 84.12 MPa,疏水性能达到了疏水材料的标准。

漆酶介体体系处理杨木浆的过程中,纸浆模塑材料纤维表面木素官能团结构发生了变化。羟基的含量增多,而羟基在分子间发生缔合,形成以氢键相连的多聚体,从而使得纤维之间的粘结作用加强,而在宏观上表现为拉伸强度的提高,同时,羰基吸收峰相对强度的增加,使得纸浆模塑材料的疏水性有所提高。

漆酶介体体系处理后的纸浆模塑包装材料,其纤维层间断面的纤维与纤维之间更加紧密,在宏观上表现为纸浆模塑材料更加密实;在纤维表面形态上,纤维与纤维的连接处有粘性物质产生,使纤维之间的连

接加强,从而使模塑包装材料的强度提高。

参考文献:

- [1] 罗瑜莹,肖生苓,李琛,等. 纤维多孔缓冲包装材料泡孔参数与其力学性能的关系[J]. 林业科学, 2017, 53(5): 116—123.
LUO Yu-ying, XIAO Sheng-ling, LI Chen, et al. Relationships between Bubble Parameters and Mechanical Properties of Fiber Porous Cushioning Packaging Material[J]. Scientia Silvae Sinicae, 2017, 53(5): 116—123.
- [2] 李志恒. 论述运输包装件湿热交变测试标准及试验设备的选择和控制方法研究[J]. 绿色包装, 2016, 37(6): 39—42.
LI Zhi-heng. Discussion on the Standard of Damp Heat Alternating Test for Transport Package Research on Selection and Control Method of Test Equipment[J]. Green Packaging, 2016, 37(6): 39—42.
- [3] 王俊丽,郑全成. 瓦楞纸箱的含水率对力学性能的影响[J]. 兰州交通大学学报, 2006, 36(3): 134—136.
WANG Jun-li, ZHENG Quan-cheng. Effect of Moisture Content of Corrugated Box on Mechanical Proper-

- ties[J]. Journal of Lanzhou Jiaotong University, 2006, 36(3): 134—136.
- [4] 张岩, 王志伟. 湿度对手机用纸浆模塑缓冲包装能量吸收特性的影响[J]. 振动与冲击, 2015, 10(1): 39—43.
ZHANG Yan, WANG Zhi-wei. Influence of Relative Humidity on Energy Absorption Properties of Pulp molded Cushioning Packaging for Mobile Phone[J]. Journal of Vibration and Shock, 2015, 10(1): 39—43.
- [5] 邵珍珠. 纸浆模塑在不同温湿度条件下的缓冲性能研究[D]. 湘潭: 湖南工业大学, 2016.
SHAO Zhen-zhu. Research on the Cushioning Properties of Pulp Molded under Various Temperature and Humidity Conditions[D]. Xiangtan: Hunan University of Technology, 2016.
- [6] SEYDEI S. Moisture Resistant, Repupable Paper Products and Method of Making Same: US, 6846573B2[P]. 2005-01-25.
- [7] CHMIELEWSKI H J, BAKER A. Superabsorbent Polymers Providing Long-term Generation of Free Volume in Partially Hydrated Absorbent Cores: US, 6710224B2[P]. 2004-03-23.
- [8] LI H, FU S, PENG L, et al. Surface Modification of Cellulose Fibers with Layer-by-layer Self-assembly of Lignosulfonate and Polyelectrolyte[J]. Effects on Fibers Wetting Properties and Paper Strength, 2012, 19(2): 533—546.
- [9] SCHUBERT M, RUEDIN P, CIVARDI C, et al. Laccase-catalyzed Surface Modification of Thermo-mechanical Pulp (TMP) for the Production of Wood Fiber Insulation Boards Using Industrial Process Water[J]. Plos One, 2015, 10(6): e0128623.
- [10] 曹明乐, 张海波, 黄峰, 等. 漆酶的研究进展[J]. 山东林业科技, 2012, 34(3): 106—115, 127.
CAO Ming-le, ZHANG Hai-bo, HUANG Feng, et al. Research Progress of Laccase[J]. Journal of Shandong Forestry Science and Technology, 2012, 34(3): 106—115.
- [11] REYNAUD C, TAPIN-LINGUA S, ELEGIR G, et al. Hydrophobic Properties Conferred to Kraft Pulp by a Laccase-catalysed Treatment with Lauryl Gallate[J]. Journal of Biotechnology, 2013, 167(3): 302—308.
- [12] THAKUR K, KALIA S, PATHANIA D, et al. Surface Functionalization of Lignin Constituent of Coconut Fibers via Laccase-catalyzed Biografting for Development of Antibacterial and Hydrophobic Properties[J]. Journal of Cleaner Production, 2016, 113(11): 176—182.
- [13] GB/T 450—2008, 纸和纸板试样的采取及试样纵横向、正反面的测定[S].
GB/T 450—2008, Paper and Board-Sampling for Testing and Identification of Machine and Cross Direction, Wire Side and Felt Side[S].
- [14] GB/T 12914—2008, 纸和纸板抗张强度的测定[S].
GB/T 12914—2008 Paper and Board-Determination of Tensile Properties[S]. Beijing: Standards Press of China, 2008.
- [15] YC/T 424—2011, 烟用纸表面润湿性能的测定-接触角法[S].
YC/T 424—2011, Determination of Surface Wettability of Paper for Cigarette-contact Angle Method[S].
- [16] MATTINEN M L, MAIJALA P, NOUSIAINEN P, et al. Oxidation of Lignans and Lignin Model Compounds by Laccase in Aqueous solvent Systems[J]. Journal of Molecular Catalysis B Enzymatic, 2011, 72(3): 122—129.
- [17] PAICE M G, BOURBONNAIS R, ARCHIBALD F S, et al. Kraft Pulp Bleaching and Delignification by Trametes Versicolor[J]. Journal of Biotechnology, 1997, 53(2/3): 215—236.
- [18] FAIX O. Classification of Lignins From Different Botanical Origins By FTIR Spectroscopy[J]. Holzforschung, 2009, 45(S1): 21—28.
- [19] 杨蕊, 周定国. 杨木和稻草微米纤维素表面官能团研究[J]. 林产工业, 2008, 7(4): 25—27.
YANG Rui, ZHOU Ding-guo. Study on Surface Function Group of Poplar and Rice Straw Micrometer Cellulose[J]. China Forest Products Industry, 2008, 7(4): 25—27.
- [20] 刘靖疆. 羧基衍生物亲水性的研究[J]. 分子科学与化学研究, 1982, 14(3): 105—110.
LIU Jing-jiang. Study on Hydrophilicity of Carbonyl Derivatives[J]. Molecular Science and Chemical Research, 1982, 14(3): 105—110.
- [21] 魏华丽, 石淑兰, 裴继诚. 漆酶活化桉木纤维提高自黏合性的表征[J]. 中国造纸学报, 2007, 23(2): 95—98.
WEI Li-hua, SHI Shu-lan, PEI Ji-cheng. Characterization of Enhanced Auto-adhesion of Eucalyptus Fibers Activated by Laccase[J]. Transactions of China Pulp and Paper, 2007, 23(2): 95—98.
- [22] 朱家琪, 史广兴. 酶活化处理条件及其对松木纤维胶合性能的影响初探[J]. 林业科学, 2004, 27(4): 153—156.
ZHU Jia-qi, SHI Guang-xing. Study of Wood-activation with Laccase and the Effect on the Auto Adhesion of Pinus Fibers[J]. Scientia Silvae Sinicae, 2004, 27(4): 153—156.
- [23] 姚培培, 肖生苓, 岳金权. 利用木质剩余物与废纸制备纸浆模塑材料的比较[J]. 森林工程, 2014, 18(4): 82—85.
YAO Pei-pei, XIAO Sheng-ling, YUE Jin-quan. Comparison of Pulp Molding Material Prepared by Using Wood Residues and Waste Paper[J]. Forest Engineering, 2014, 18(4): 82—85.
- [24] FELBY C, PEDERSEN L S, BO R N. Enhanced Auto Adhesion of Wood Fibers Using Phenol Oxidases[J]. Holzforschung, 1997, 51(3): 281—286.