

稻草秸秆纤维和纸板的制备工艺及性能

杜亚洲^a, 岳金权^b, 肖生苓^a, 赵银玲^a

(东北林业大学 a.工程技术学院 b.材料科学与工程学院, 哈尔滨 150040)

摘要: **目的** 探讨各因素(液比(稻草绝干原料质量与水的质量之比)、蒸煮温度、保温时间、氢氧化钠用量)对稻草纤维制备工艺的影响,研究采用稻草纤维制备模塑包装材料的可行性。**方法** 采用单因素法探究各因素对稻草纤维分离工艺的影响,通过力学性能测试和电镜扫描等手段对秸秆纤维进行分析。**结果** 确定了最佳的稻草纤维制备工艺,液比为 1:5,蒸煮温度为 100 ℃,保温时间为 90 min,NaOH 用量(用量指占稻草绝干原料质量的比例)为 8%。该工艺下的粗浆得率为 73.97%,裂断长为 6254.05 m,弯曲强度为 76.13MPa,弹性模量为 6813.71MPa。从 SEM 图可以看出,经碱处理后纤维结合得较为紧密。**结论** 经碱处理后的稻草秸秆纤维纸板结构紧密,力学性能得到了很大提升,可以取代废纸制备的纸板;在处理过程中 NaOH 用量和蒸煮温度对材料性能的影响较大,且应尽量避免浆料中碳水化合物的降解。

关键词: 秸秆纤维;粗浆得率;工艺参数;力学性能;微观结构

中图分类号: TB484.1 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3563(2018)13-0008-07

DOI: 10.19554/j.cnki.1001-3563.2018.13.002

Preparation Process and Properties of Rice Straw Fiber and Paperboard

DU Ya-zhou^a, YUE Jin-quan^b, XIAO Sheng-ling^a, ZHAO Yin-ling^a

(Northeast Forestry University a.College of Engineering & Technology

b.Material Science and Engineering College, Harbin 150040, China)

ABSTRACT: The work aims to study the influence of various factors (liquid ratio (the ratio of mass of oven dry material to that of the water), cooking temperature, holding time and sodium hydroxide) on the preparation process of rice straw fiber, and the feasibility of producing functional molded packaging materials with rice straw fiber. The single factor method was used to study the influence of various factors on the straw fiber separation process. The straw fibers were analyzed by the test of mechanical properties and electron microscope scanning. The optimum straw fiber preparation process was determined. The liquid ratio was 1 : 5, the cooking temperature was 100 ℃, the holding time was 90 min and the amount of NaOH was 8% (the amount indicated the ratio of such drug to the mass of the oven dry material of the rice straw). The coarse pulp yield of the process was 73.97%, the fracture length was 6254.05 m, the bending strength was 76.13 MPa and the elastic modulus was 6813.71 MPa. From the SEM images, it could be seen that the fibers bound more closely after alkali treatment. The alkali-treated straw fiberboard has compact structure and greatly improved mechanical properties, and it can replace the paperboard prepared from waste paper. In the treatment process, the NaOH amount and the cooking temperature have a great influence on the material properties, and the carbohydrate degradation in the slurry should be avoided as much as possible.

KEY WORDS: straw fiber; coarse pulp yield; process parameters; mechanical properties; microstructure

中国是农业大国,秸秆资源丰富,年均产量 7~ 8 亿 t,并且总体呈现增长的趋势^[1-2]。我国年均可回

收稿日期: 2018-03-15

基金项目: 哈尔滨市应用技术与开发项目(2016RAXXJ004)

作者简介: 杜亚洲(1993—),男,东北林业大学硕士生,主攻物流工程。

通信作者: 岳金权(1963—),男,硕士,东北林业大学副教授,主要研究方向为生物质材料资源化利用及高得率浆制备理论与技术。

收秸秆达 7 亿 t, 在可回收的秸秆中, 直接还田的约为 15.6%, 用于生产动物饲料的约为 30.7%, 用于工业能源的约为 17.9%, 用于材料制备的仅占 5.25% (其中只有 2.6% 用作工业造纸的原料), 直接焚烧的秸秆资源比例高达 30.6%^[3-5], 因此, 合理有效地开发利用储量巨大的农作物秸秆是十分必要的。目前, 秸秆纤维已经被应用于各个领域, 较为常见的有保温墙材料、建筑基材、复合材料等^[6-9]。

模塑材料是一种能够替代 EPS 发泡塑料和实木材料的新型材料, 是用一定浓度的纸浆在带滤网的模具中通过真空或加压的方式使纤维均匀分布在模具表面, 形成具有模具造型的湿纸胚, 后期经过热压、干燥、整形等工艺而制成的包装材料。由于在禾草类纤维纸板湿法制备中产生的废水污染较大, 因此将稻草秸秆作为纸浆模塑包装材料原料的研究甚少。文中采用少量的氢氧化钠作为浸渍剂对稻草秸秆进行预处理, 通过单因素法优化制浆工艺参数及流程, 并以稻草秸秆纤维的粗浆得率、模塑材料的力学性能等作为评价指标, 分析不同处理条件对制备高强度模塑材料的影响, 为后续稻草秸秆工业化生产提供参考。实验中产生的废水含有大量的无机物和有机物, 课题组其他成员人为创造适于微生物生存、繁殖的环境, 采用降解代谢处理废水, 以形成颗粒状污泥, 解决废水问题。

1 实验

1.1 原料及试剂

原料及试剂: 稻草秸秆, 收集于黑龙江省哈尔滨市平房区; 氢氧化钠 (NaOH), 分析纯, 有效成分为 96%, 天津市瑞金特化学品有限公司。

1.2 主要仪器及设备

主要仪器及设备: 立式蒸煮锅、ZSP-300 型高浓盘磨机、ZT4-04 型打浆机 (北京西润斯仪器仪表有限公司)、ZT7-02 型纸样成型机 (兴平市中通试验装备有限公司)、ZT16-00 型纤维解离器 (兴平市中通试验装备有限公司)、ZG-20T 型热压机 (东莞市正工机电设备科技有限公司)、SANS 万能试验机 (深圳市新三思计量技术有限公司)、QUANTA200 型扫描电镜 (美国 FEI 公司)。

1.3 方法

1.3.1 稻草秸秆纤维初步分离

稻草秸秆初步处理: 筛选去杂→裁切 (5~7 cm)→风选 (除去草叶)→平衡水分→含水率测定→装袋备用。

碱处理稻草纤维分离: 将初步处理的稻草秸秆与水、氢氧化钠等按比例混合搅拌均匀, 按照设定的时间、温度蒸煮, 水洗至中性, 甩干, 装袋备用。

一般采用粗浆得率来评价稻草纤维中木素、半纤维素及杂细胞的去除情况。粗浆得率是指浆料蒸煮前后质量的比值, 比值越低表示木质素、杂细胞等物质脱除得越彻底^[10-11], 其计算方法:

$$X = \frac{m_1}{m_2} \times 100\% \quad (1)$$

式中: X 为粗浆得率 (%); m_1 为蒸煮后绝干浆料质量 (g); m_2 为蒸煮前绝干原料质量 (g)。

为了保证实验数据的准确性, 每一个方案做 3 组实验, 且每组实验测 2 次, 粗浆得率为 6 次实验的平均值。

1.3.2 浆料处理及材料成型

1) 纤维的机械分离。为了保证稻草纤维分离充分, 将碱处理后的浆料在高浓盘磨机中进行两段盘磨 (第 1 段磨盘间隙为 0.5 mm, 第 2 段磨盘间隙为 0.2 mm), 水洗, 甩干; 根据 GB/T 3703—1999 对浆料进行打浆处理, 根据 GB/T 3332—2004 测定浆料叩解度 (30°SR 为统一标准), 将处理好的浆料甩干、备用。

2) 材料成型。材料成型主要分为 2 个阶段, 第 1 阶段为纸板抄造、冷压成型; 第 2 阶段为热压成型。具体的工艺流程: 按照 800 g/m² 的标准抄造湿纸胚 (由于定量较大, 利用湿纸胚自身重量脱离铜网完成取样), 冷压, 压力为 2 MPa, 保压 5 min, 纸胚含水率控制在 70%; 将冷压后的纸胚热压, 温度为 190 °C, 压力为 2.5 MPa, 保温 15 min, 然后取出、冷却, 得到直径为 200 mm、厚度约为 0.8 mm 的所需模塑材料。

1.4 力学性能测试及微观分析

1.4.1 拉伸及弯曲性能测试

拉伸实验根据 GB/T 13022—91, 拉伸速度为 10 mm/min, 标距为 100 mm; 弯曲试验采用三点弯曲法, 根据 GB/T 9341—2000, 弯曲速度为 10 mm/min, 跨距为 60 mm。

1.4.2 微观结构分析

在温度为 25 °C, 相对湿度为 50% 的条件下, 采用扫描电子显微镜对碱处理前后模塑材料的横截面和剖面进行观察及分析。电镜观察前对试样进行 60 s 的喷金处理。

1.5 数据处理及方法

采用 Spss19.0 和 Excel 统计软件对数据进行统计处理及差异显著性分析。

2 结果与分析

2.1 稻草纤维分离工艺参数对粗浆得率的影响

制浆工艺是一个脱除木素、分离纤维的过程,液比、蒸煮温度、保温时间、NaOH 用量等参数在脱除木素、分离纤维中起着至关重要的作用。粗浆得率可以很好地表征木素的脱除程度,通过分析以上 4 个参数对粗浆得率的影响,探究稻草浆料性能的优劣。

2.1.1 液比对稻草纤维粗浆得率的影响

为了确保碱液能够渗透原料,并根据前期预实验,以 1:3 的液比作为最小液比,分别选取 1:3, 1:4, 1:5, 1:6 的液比进行实验。在 NaOH 用量为 8%、蒸煮温度为 100 ℃、保温时间为 90 min 条件下,不同液比与稻草纤维粗浆得率的关系见图 1。

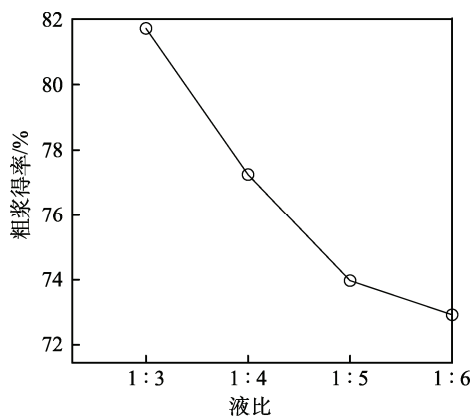


图 1 液比对稻草纤维粗浆得率的影响

Fig.1 Effect of liquid ratio on the yield of straw fiber coarse pulp

由图 1 可以看出,随着液比的逐渐增大,稻草秸秆的粗浆得率会逐渐减小,当液比达到 1:6 时,得率最低为 72.92%。液比从 1:3 到 1:5 的过程中,粗浆得率下降的速率较快,即木素脱除得较充分。当液比较小时,蒸煮液中碱浓度较大,木素向溶液扩散的速率减小,减缓了木素和半纤维素等物质的溶解。当液比过大时,稻草的粗浆得率虽有所增加,但会浪费水资源^[12],因此选择 1:5 的液比较为合适,此时得率为 73.97%。

2.1.2 蒸煮温度对稻草纤维粗浆得率的影响

由于蒸煮温度是制浆工艺中能源消耗的重要因素之一,当温度大于 100 ℃后,木素脱除的速率小于温度升高的速率,同时温度的升高将会导致碳水化合物的降解^[13]。从资源、成本、材料性能等角度考虑,采用常压下的温度作为实验的温度范围,探索在升温过程中木素的脱除情况。在 NaOH 用量为 8%、保温时间为 90 min、液比为 1:5 条件下,不同蒸煮温度与稻草纤维粗浆得率的关系见图 2。

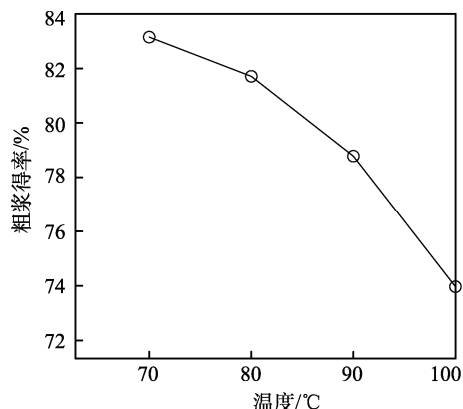


图 2 蒸煮温度对稻草纤维粗浆得率的影响

Fig.2 Effect of cooking temperature on coarse pulp yield of straw fiber

由图 2 可以看出,随着温度的升高,得率逐渐减小,即表示木素的脱除量逐渐增大。从 80 ℃到 100 ℃,秸秆的粗浆得率呈现近乎直线式的下降。这是由于木质素、果胶以及某些大分子物质只有在较高的温度下才能降解。

2.1.3 保温时间对稻草纤维粗浆得率的影响

木素脱除与保温时间密切相关,较短的时间不能保证木素脱除彻底,较长的时间又会造成碳水化合物的水解^[13],因此选择 30, 60, 90, 120 min 作为保温时间。在 NaOH 用量为 8%、蒸煮温度为 100 ℃、液比为 1:5 的条件下,不同保温时间与稻草纤维粗浆得率的关系见图 3。

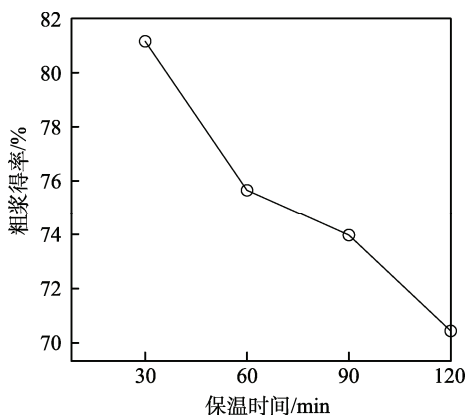


图 3 保温时间对稻草纤维粗浆得率的影响

Fig.3 Effect of holding time on the coarse pulp yield of straw fiber

由图 3 可知,随着保温时间的增加,秸秆的粗浆得率逐渐降低。前 30 min,粗浆得率为 81.16%,大部分是热水溶出物质,木素溶出较少。随着时间的延长,热水溶出物完全溶出后,粗浆得率在 30~60 min 过程中降低了近 6%。保温时间从 60 min 增加到 90 min 时,粗浆得率下降幅度减小,而从 90~120 min 时,粗浆得率又大幅度下降。结合郑杰等人的研究成

果^[14—15]可知, 30~90 min 应该为木素大量脱除的阶段, NaOH 与木素中的羟基、醚键等结合生成钠盐, 使得木素的大分子结构降解, 溶于碱液中。90~120 min 时间段为碳水化合物的降解阶段。为了保证模塑材料的性能, 适当地延长保温时间是可取的, 但应尽量避免碳水化合物的大量降解和木素的完全脱除^[15], 因此选择 90 min 作为最佳保温时间。

2.1.4 NaOH 用量对稻草纤维粗浆得率的影响

NaOH 能够与浆料中的木素、半纤维素等物质反应生成钠盐, 但是 NaOH 用量过低制备的浆料成板性能较差, 过高的 NaOH 用量又会造成环境的污染, 因此选择 NaOH 用量为 4%, 6%, 8%, 10%。在蒸煮温度为 100 ℃、保温时间为 90 min、液比为 1 : 5 条件下, 不同 NaOH 用量与稻草纤维粗浆得率的关系见图 4。

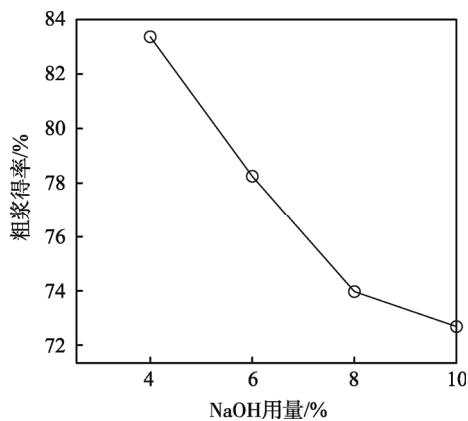


图 4 NaOH 用量对稻草纤维粗浆得率的影响
Fig.4 Effect of amount of NaOH on the coarse pulp yield of straw fiber

由图 4 可以看出, 随着 NaOH 用量的增加, 稻草纤维的粗浆得率逐渐减小, 且呈现出线性关系。当

NaOH 用量从 4%增加到 8%时, 粗浆得率从 83.37%降为 73.97%, 降低了近 10%。这表明 NaOH 用量对木素的脱除有很大的影响^[16]。NaOH 用量从 8%到 10%的过程中粗浆得率下降速率趋于平缓, 因此选择 NaOH 用量为 8%。

2.1.5 稻草纤维分离最佳工艺参数的选择

根据单因素实验, 确定液比、蒸煮温度、保温时间、NaOH 用量等 4 个制浆工艺的最佳参数分别为: 液比 1 : 5, 蒸煮温度 100 ℃, 保温时间 90 min, NaOH 用量 8%。后续实验均采用这一工艺参数制备浆料。

2.2 稻草纤维模塑材料力学性能

抗张强度是模塑包装材料重要的力学性能指标之一, 可以表征所制备模塑包装材料的优劣。裂断长是衡量纸页或纸板抗张强度的指标, 主要受纤维间结合力和纤维平均长度的影响, 同时与纤维的交织排列和纤维自身的强度等有关。弯曲强度可表征纤维结合强度和纤维自身的刚性, 纤维的结合强度与打浆度、原料的处理状况、纤维自身的特性等相关^[17—18]。

该实验以弯曲弹性模量、裂断长、弯曲强度为衡量模塑材料优劣的参考指标, 对比废纸板、处理浆料以及未处理浆料制备模塑材料的性能。对比不同处理条件对稻草秸秆模塑材料力学性能的影响, 见表 1。

由表 1 可知, NaOH 用量和温度对模塑材料力学性能影响较大。当 NaOH 用量从 8%上升到 10%时, 弹性模量增加了 1378.996 MPa。这是由于 NaOH 用量的增加使得纤维素分子链发生重新排列, 微纤丝角减小, 清除了部分纤维表面的非纤维素成分, 单根纤维强度增加^[19]。碱量的增大促进了碳水化合物的降解, 浆料中纤维的占有率增加, 纤维间的交织更加紧密, 使得热压过程中能够形成更多的氢键, 因此模塑材料具有较好的抵抗变形能力。

表 1 不同处理条件对稻草秸秆模塑材料力学性能的影响
Tab.1 Effect of different treatment conditions on mechanical properties of rice straw molded materials

编号	温度/℃	保温时间/min	液比	NaOH 用量/%	拉伸强度/MPa	裂断长/m	弯曲强度/MPa	弹性模量/MPa
1	100	90	1 : 3	8	33.87	4642.23	63.54	5668.23
2	100	90	1 : 4	8	37.95	5184.36	68.71	5903.78
3	100	90	1 : 5	8	42.96	6254.05	76.13	6813.71
4	100	90	1 : 6	8	35.87	4823.83	69.44	5802.31
5	100	30	1 : 5	8	33.00	4590.16	70.09	6017.72
6	90	90	1 : 5	8	38.28	5258.75	71.02	6203.02
7	100	60	1 : 5	8	39.29	5548.15	73.85	6772.83
8	100	120	1 : 5	8	44.01	6193.75	79.00	6902.43
9	80	90	1 : 5	8	37.76	5143.17	65.66	5857.49
10	100	90	1 : 5	4	30.62	4351.29	45.76	4624.60
11	70	90	1 : 5	8	33.66	4770.09	64.94	5703.56
12	100	90	1 : 5	6	35.47	4938.23	65.14	6252.22
13	100	90	1 : 5	10	48.18	6801.35	88.18	8192.71

由表 2 可知,经碱处理后,稻草纤维纸板与未处理稻草纤维纸板、废纸模塑纸板、木质剩余物纸板相比,拉伸强度、裂断长和弹性模量均有显著差异性($P<0.05$)。其中未处理纤维纸板的弹性模量和木质剩余物纸板没有显著差异($P>0.05$)。通过对比可知,稻草秸秆纤维纸板具有可行性,完全可以取代废纸原料。相较于木材剩余物纤维而言,其拉伸强度较低,但弹性模量较大,因此后续优化实验应该在保证弹性模量的前提下,提高稻草秸秆模塑材料的抗张强度。

表 2 不同原料制备的模塑材料力学性能的比较
Tab.2 Comparison of mechanical properties of molded materials prepared from different raw materials

原料	拉伸强度/MPa	裂断长/m	弹性模量/MPa
稻草秸秆 (未处理)	24.35 a	3140.20 a	4398.48 a
稻草秸秆 (碱处理)	42.96 c	6254.05 c	6813.71 c
废纸	36.99 b	4778.40 b	5346.61 b
木质剩余 物化机浆	75.83 d	—	4700.00 a

注:不同字母表示在 $P<0.05$ 水平差异显著

表 3 为上述 4 种原料的纤维长宽比。结合表 2 的力学性能可知,纤维长宽比以及纤维长度对力学性能

均有影响,原料纤维的绝对长度是最基本、最重要的因素。由表 3 可知木质剩余物的纤维是最长的,拉伸强度最好;碱处理稻草纤维长宽比较大、纤维较短,性能次之;废纸的纤维最短、长宽比最小,力学性能差;未处理稻草长宽比较大,但大量木素的存在使得纤维柔性较差,成纸性能最差。

表 3 不同原料的纤维长宽比
Tab.3 Fiber aspect ratio of different raw materials

原料	长度/mm	平均长度/mm	宽度/ μm	平均宽度/ μm	长宽比
稻草秸秆 (未处理)	0.45~1.02	0.93	5.43~9.55	8.92	104.26
稻草秸秆 (碱处理)	0.28~1.35	0.81	4.98~15.26	8.70	93.10
废纸	0.12~1.20	0.62	7.63~29.78	17.44	35.72
木质剩余 物化机浆	1.06~1.34	1.16	10.65~23.97	16.87	68.76

2.3 稻草纤维模塑材料微观结构分析

采用扫描电镜对碱处理前后模塑材料的横截面和剖面结构进行观察,探讨不同纤维结构对模塑材料性能的影响。碱处理前后稻草秸秆纤维纸板的 SEM 见图 5。

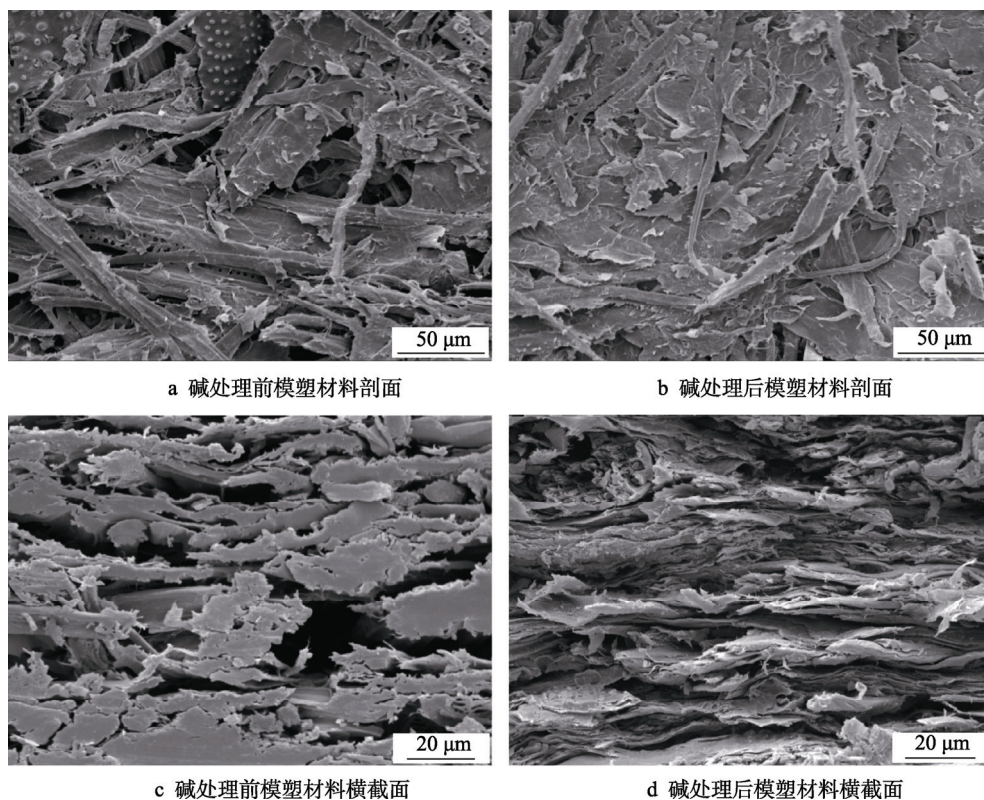


图 5 碱处理前后纤维模塑材料的 SEM 图

Fig.5 SEM image of fiber molded material before and after alkali treatment

碱处理前后模塑材料剖面的 SEM 图分别见图 5a—b。从图 5a 可以看出, 未经过碱处理的模塑材料中的纤维以纤维束的形式存在于纸板中, 形成的剖面较为疏松, 其中含有许多孔洞, 纤维之间的结合较差。由图 5b 可看出, 模塑材料中存在部分木素, 其在热压过程中起着胶黏剂的作用, 使得纤维能够较好地粘结在一起, 提高了模塑材料的力学性能^[20—21]。

碱处理前后模塑材料横截面的 SEM 图见图 5c—d。从图 5c 可以看到纤维束的存在, 同时看到纤维之间的结合较疏松, 有大量的间隙存在。从图 5d 可以看到, 纤维被压成扁平状且纤维间能够紧密地交织在一起, 只有少许的孔洞形成。

3 结语

通过单因素实验确定, 得到模塑包装材料的稻草纤维制备工艺的最佳参数: 液比 1:5, 蒸煮温度 100℃, 保温时间 90 min, NaOH 用量 8%。此时粗浆得率为 73.97%, 裂断长为 6254.05 m, 弯曲强度为 76.13 MPa, 弹性模量为 6813.71 MPa。其中 NaOH 用量和蒸煮温度对模塑材料性能影响较大。

废纸、未处理稻草秸秆、碱处理稻草秸秆、木质剩余物纤维这 4 种原料制备的模塑材料综合力学性能优劣顺序为: 木质剩余物纤维>碱处理稻草秸秆>废纸>未处理稻草秸秆。

碱处理后模塑材料中的纤维结合紧密, 力学性能强, 而未处理的模塑材料中含有大量纤维束, 剖面和横截面存在大量的孔洞, 力学性能较差。

参考文献:

- [1] 彭春艳, 罗怀良, 孔静. 中国作物秸秆资源量估算与利用状况研究进展[J]. 中国农业资源与区划, 2014, 35(3): 14—20.
PENG Chun-yan, LUO Huai-liang, KONG Jing. Research Progress on the Estimation and Utilization of Crop Straw Resources in China[J]. Agricultural Resources and Regional Planning in China, 2014, 35(3): 14—20.
- [2] 毕于运, 王亚静, 高春雨. 中国主要秸秆资源数量及其区域分布[J]. 农机化研究, 2010, 32(3): 1—7.
BI Yu-yun, WANG Ya-jing, GAO Chun-yu. China's Main Straw Resource Quantity and Its Regional Distribution[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2010, 32(3): 1—7.
- [3] 高祥照, 马文奇, 马常宝, 等. 中国作物秸秆资源利用现状分析[J]. 华中农业大学学报, 2002, 21(3): 242—247.
GAO Xiang-zhao, MA Wen-qi, MA Chang-bao, et al. Analysis on Current Status of Utilization of Crop Straw Resources in China[J]. Journal of Huazhong Agricultural University, 2002, 21(3): 242—247.
- [4] 高利伟, 马林, 张卫峰, 等. 中国作物秸秆养分资源数量估算及其利用状况[J]. 农业工程学报, 2009, 25(7): 173—179.
GAO Li-wei, MA Lin, ZHANG Wei-feng, et al. Estimation of Nutrient Resources of Crop Straw in China and Its Utilization Status[J]. Journal of Agricultural Engineering, 2009, 25(7): 173—179.
- [5] 孙娇. 我国农作物秸秆综合利用分析[J]. 农村牧区机械化, 2015, 22(1): 19—21.
SUN Jiao. Analysis of Comprehensive Utilization of Crop Straw in China[J]. Mechanization of Rural Pastoral Areas, 2015, 22(1): 19—21.
- [6] MANSOUR A, SREBRIC J, BUELEY B J. Development of Straw-cement Composite Sustainable Building Material for Low-cost Housing in Egypt[J]. Applied Science Research, 2007, 3(11): 1571—1580.
- [7] 袁斌, 曹宝珠, 段文峰. 秸秆草砖在建筑中的应用与研究现状分析[J]. 吉林建筑工程学院学报, 2014, 31(3): 19—22.
YUAN Bin, CAO Bao-zhu, DUAN Wen-feng. The Application and Research Status of Straw Brick in Building[J]. Journal of Jilin Architectural and Civil Engineering Institute, 2014, 31(3): 19—22.
- [8] YAO Fei, WU Qing-lin, LEI Yong, et al. Rice Straw Fiber-reinforced High-density Polyethylene Composite: Effect of Fiber Type and Loading[J]. Industrial Crops and Products, 2008, 28(1): 63—72.
- [9] 徐淑艳, 谢元仲, 孟令馨. 生物质基复合材料在食品包装中的应用[J]. 森林工程, 2016, 32(3): 85—89.
XU Shu-yan, XIE Yuan-zhong, MENG Ling-xin. Application of Biomass Composites in Food Packaging[J]. Forest Engineering, 2016, 32(3): 85—89.
- [10] 王双飞. 制浆造纸实验[M]. 北京: 中国轻工业出版社, 2010.
WANG Shuang-fei. Pulp and Paper Experiment[M]. Beijing: China Light Industry Press, 2010.
- [11] 潘刚伟, 侯秀良, 朱澍, 等. 用于复合材料的小麦秸秆纤维性能及制备工艺[J]. 农业工程学报, 2012, 28(9): 287—292.
PAN Gang-wei, HOU Xiu-liang, ZHU Xi, et al. Wheat Straw Fiber Properties and Preparation Process for Composite Materials[J]. Journal of Agricultural Engineering, 2012, 28(9): 287—292.
- [12] 袁金龙, 胡会超, 柴欣生. 液比对尾叶桉硫酸盐法制浆过程中脱木素的影响[J]. 造纸科学与技术, 2011, 30(4): 8—10.
YUAN Jin-long, HU Hui-chao, CHAI Xin-sheng. Effect of Liquid Ratio on Delignification of Eucalyptus Urophylla by Kraft Pulping[J]. Paper Science and Technology, 2011, 30(4): 8—10.
- [13] 王忠良. 尾叶桉一级深度脱木素蒸煮及其漂白的研究[D]. 南京: 南京林业大学, 2004.
WANG Zhong-liang. Study on a Class of Deep Degradation and Bleaching of Lignin from Eucalyptus

- Urophylla[D]. Nanjing Forestry University, 2004.
- [14] ZHANG Dai-hui, ZHANG An-jiang, XUE Lin-xin. A Review of Preparation of Binderless Fiberboards and Its Self-bonding Mechanism[J]. Wood Science & Technology, 2015, 49(4): 661—679.
- [15] 郑杰, 孙广卫, 李海明, 等. 绿液预处理杨木硫酸盐法蒸煮脱木素反应历程研究[J]. 中国造纸学报, 2013, 28(4): 12—17.
- ZHENG Jie, SUN Guang-wei, LI Hai-ming, et al. Study on Reaction Process of Green Liquor Pretreatment Poplar Kraft Cooking Delignification[J]. Journal of Chinese Paper Making, 2013, 28(4): 12—17.
- [16] XIAO Bin, SUN Xiao-feng, SUN Run-cang. Chemical, Structural, and Thermal Characterizations of Alkali-soluble Lignin and Hemicelluloses, and Cellulose from Maize Stems, Rye Straw, and Rice Straw[J]. Polymer Degradation and Stability, 2001, 74(2): 307—319.
- [17] 周丽虹, 薛国新, 郭小燕, 等. 纸浆性能对白纸板包装材料强度的影响[J]. 纸和造纸, 2008, 27(3): 48—51.
- ZHOU Li-hong, XUE Guo-xin, GUO Xiao-yan, et al. Effect of Pulp Properties on the Strength of White Paperboard Packaging Materials[J]. Paper and Paper, 2008, 27(3): 48—51.
- [18] 荣人慧, 肖生苓, 岳金权, 等. 纤维模塑包装材料力学性能指标体系的构建[J]. 包装工程, 2016, 37(13): 24—29.
- RONG Ren-hui, XIAO Sheng-yu, YUE Jin-quan, et al. Construction of Mechanical Performance Index System for Fiber Molded Packaging Materials[J]. Packaging Engineering, 2016, 37(13): 24—29.
- [19] 郑明霞, 李来庆, 郑明月, 等. 碱处理对玉米秸秆纤维素结构的影响[J]. 环境科学与技术, 2012, 35(6): 27—31.
- ZHENG Ming-xia, LI Lai-qing, ZHENG Ming-yue, et al. Effect of Alkali Treatment on Cellulose Structure of Corn Stalk[J]. Environmental Science and Technology, 2012, 35(6): 27—31.
- [20] WANG Quan-liang, XIAO Sheng-ling, SHI S Q, et al. Mechanical Strength, Thermal Stability, and Hydrophobicity of Fiber Materials after Removal of Residual Lignin[J]. Bioresources, 2017, 13(1): 71—85.
- [21] 马灼明, 李淑君, 杨冬梅. 酶解木质素的活化及用于酚醛树脂的制备[J]. 森林工程, 2017, 33(2): 64—67.
- MA Shao-ming, LI Shu-jun, YANG Dong-mei. Enzymatic Hydrolysis of Lignin and Preparation of Phenolic Resins[J]. Forest Engineering, 2017, 33(2): 64—67.