

生物质复合包装板材的制备及性能

范吕慧^{1,2}, 卫灵君^{1,2}, 史云青^{1,2}, 刘雨卉^{1,2}, 孙昊^{1,2,3}, 王海建⁴, 钱傲冉⁴

(1.江南大学 机械工程学院, 江苏 无锡 214122; 2.江苏省食品先进制造装备技术重点实验室, 江苏 无锡 214000; 3.清华苏州环境创新研究院, 江苏 苏州 215000; 4.昆山新昆生物能源热电有限公司, 江苏 苏州 215000)

摘要: **目的** 为了高值化利用固体废弃物资源, 以污水厂的污泥燃烧产物——生物质灰、废纸和废木屑为原料, 采用热压工艺制备生物质复合包装板材。**方法** 考察原料配方、胶黏剂种类和热压温度对复合包装板材结构和性能的影响。**结果** 实验结果表明, 环氧树脂为相对最佳的胶黏剂, 当纸纤维、生物质灰、废弃木屑和环氧树脂的质量比为 40:30:20:10 时, 在 4 MPa、180 °C 下热压 20 min 制备的复合板材的抗弯强度为 11.20 MPa, 抗压强度为 12.79 MPa, 满足《框架木箱》(GB/T 7284—2016) 的要求。扫描电镜显示, 所制备的生物质复合板材的表面纤维呈网状分布, 生物质灰颗粒均匀地附着在纤维上。与普通木材相比, 生物质复合板材具有良好的热稳定性。**结论** 添加质量分数为 30% 生物质灰制备的生物质复合板材满足国标要求, 可应用于包装领域。该研究不仅可缓解木材短缺现状, 还为废弃资源再利用和生物质灰的资源化处置提供了新的研究思路。

关键词: 生物质; 复合板材; 性能; 资源化

中图分类号: TS653.5 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3563(2022)21-0069-09

DOI: 10.19554/j.cnki.1001-3563.2022.21.009

Preparation and Performance of Biomass Composite Packaging Board

FAN Lv-hui^{1,2}, WEI Ling-jun^{1,2}, SHI Yun-qing^{1,2}, LIU Yu-hui^{1,2}, SUN Hao^{1,2,3},
WANG Hai-jian⁴, QIAN Ao-ran⁴

(1. School of Mechanical Engineering, Jiangnan University, Jiangsu Wuxi 214122, China; 2. Jiangsu Provincial Key Laboratory of Advanced Food Manufacturing Equipment Technology, Jiangsu Wuxi 214000, China; 3. Tsinghua Suzhou Environmental Innovation Research Institute, Jiangsu Suzhou 215000, China; 4. Kunshan Xinkun Bio-energy Thermal Power Co., Ltd., Jiangsu Suzhou 215000, China)

ABSTRACT: The work aims to manufacture biomass composite packaging boards with biomass ash from sewage sludge combustion, waste paper fiber and waste wood chips through hot pressing to make high-valued use of the solid waste resources. The effects of raw material formula, adhesive type and hot pressing temperature on the structure and properties of composite packaging board were investigated. The results showed that epoxy resin was the best adhesive. When the mass ratio of paper fiber, biomass ash, waste wood chips and epoxy resin was 40:30:20:10, the bending strength and compressive strength of the composite board prepared by hot pressing process at 4 MPa, 180 °C for 20 min were 11.20 MPa and 12.79 MPa, respectively, meeting the requirements of GB/T 7284-2016 "Frame Wooden Box". SEM images showed

收稿日期: 2022-01-18

基金项目: 江苏省食品先进制造装备技术重点实验室自主研究课题资助项目 (FMZ201905)

作者简介: 范吕慧 (1997—), 女, 硕士生, 主攻生物质包装材料。

通信作者: 孙昊 (1981—), 女, 副教授, 硕导, 主要研究方向为生物质资源综合利用, 包装与环境, 包装材料与结构等。

that the biomass ash particles were uniformly attached to the fibers, and the fibers were distributed in a network on the surface of the biomass composite board. It had better thermal stability than ordinary wood. The biomass composite board prepared by adding 30 g biomass ash meets the requirements of national standards and can be used in packaging. This study can not only alleviate the shortage of wood, but also provide a new research idea for the reuse of waste resources and the resource disposal of biomass ash.

KEY WORDS: biomass; composite board; performance; resource recovery

目前,我国的用材林蓄积量仅为 55.1 亿 m^3 ,每年会消耗近 5 亿 m^3 的木材,木材对外依赖度达到了 50% 左右。由此可见,不仅需要加大人力、物力种植人工林,还需研究生产更多种类和功能的板材,以缓解目前的林木资源危机。近年来,科学界一直致力于研究采用成本低廉的替代原料制备板材,如生物质纤维类材料^[1-7]和固废材料^[8-14]等。

Dyna 等^[1]研究了以玉米渣为原料,采用纯化的硫酸盐木质素合成纤维板,所生产的纤维板具有良好的力学性能和耐水性。Garcia-Garcia 等^[2]采用一种海草和生物基环氧树脂热压制备纤维板,发现经过碱处理和硅烷化处理后纤维板的力学性能得到显著提高。这些生物质纤维材料不能直接用于板材,需采用蒸煮、改性、提纯等前处理手段,工艺较复杂且材料的强度不高。

固废材料的来源广泛,常见的有废纸、废木屑、粉煤灰、污水厂污泥等。采用固废材料制备板材,既循环利用了废弃资源,又大幅降低了板材的成本,减少了木资源的消耗。陈瑞建等^[8]采用质量分数小于 20% 的废纸片与木材刨花混合制备了木/纸复合刨花板,其性能满足家具型刨花板要求。Dukarska 等^[9]使用废弃牛皮纸浆代替刨花板中的木片,发现采用纸浆(质量分数为 25%)替代木片制备的防潮复合板符合 EN312 要求。马舒慧等^[10]采用杨木粉和聚乙烯制备木塑复合材料,发现经硅烷处理的木粉使得材料的性能得到有效改善。Chithambaram 等^[13]研究发现,采用质量分数为 15% 的粉煤灰替代砂浆的竹基水泥板具有较大的延展性,这与常规砂浆相同。Gohatre 等^[14]研究发现,添加粉煤灰后再生聚氯乙烯复合板的强度增大,热性能也得到改善。废纸与木屑是常见的人造板替代性原料,粉煤灰具有良好的胶凝活性和较小的粒度^[15],常用于建筑材料和人造板(如水泥、混凝土和塑料复合板材的填料),它具有良好的保温性能和阻燃性能。由于粉煤灰由燃煤制成,成本较高,且煤炭属于不可再生资源,因此其来源受到限制。

生物质灰是生物质燃料燃烧后产生的,可根据生物质的种类分为木质类生物质灰(木屑、树皮针叶等)、草本类生物质灰(稻草、麦秸等)、水生类生物质灰(水葫芦等水生植物)、动物类生物质灰(动物粪便等)、工业类生物质灰(纸张、污泥、废橡胶等)等^[16-17]。生物质灰的主要成分为 SiO_2 、 Al_2O_3 、 CaO 等无机物^[18],它是一种廉价易得的固废材料,

在道路、水土处理、陶瓷、催化剂、混凝土和水泥等领域的应用较广泛^[19]。目前,以生物质灰、废纸纤维和废木屑为增强填料制备生物质复合板材的研究在国内鲜有报道。文中以污泥燃烧产生的生物质灰、废纸纤维和废弃木屑为主要原料,利用热压成型技术制备生物质复合包装板材,探讨原料配方、胶黏剂种类和热压温度对复合板材的结构和性能的影响规律,以期废弃纤维和生物质灰的资源化利用提供新的研究思路。

1 实验

1.1 材料与仪器

主要材料:废纸,常州诚鑫环保科技有限公司;废弃木屑,粒度 $< 0.85 \text{ mm}$,江苏泰来包装工程有限公司;生物质灰,有机质的质量分数为 14.24%,粒度 $< 100 \mu\text{m}$,新昆生物能源热电有限公司;马铃薯淀粉,分析纯 AR,廊坊康普汇维科技有限公司;苯丙乳液,固体的质量分数为 40%,东莞市创纬胶黏剂科技有限公司;酚醛树脂,固体的质量分数 $\geq 70\%$,河南铂润铸造材料有限公司;环氧树脂,黏度为 $22 \text{ Pa}\cdot\text{s}$,浙江奉隆环保科技有限公司;丙酮,分析纯 AR,国药集团化学试剂有限公司。

主要仪器:LC-L01 破壁料理机,宁波思博特电器有限公司;OS20-S 搅拌器,大龙兴创实验仪器(北京)有限公司;HH-4A 数显恒温水浴锅,常州恒隆仪器有限公司;TY601H-10T 数控热压机,宁波市余姚机械设备有限公司;ARL 4200 X 射线荧光光谱仪(XRF),美国赛默飞世尔科技有限公司;D2 PHASER X 射线衍射仪(XRD),德国布鲁克 AXS 有限公司;Su1510 扫描电子显微镜(SEM),日本日立株式会社;STA449 F3 同步热分析仪,德国耐驰仪器制造有限公司;Model E43 微机控制电子万能试验机,英国 LLOYD 劳埃德仪器公司。

1.2 预处理

1) 纤维浸泡处理。将废纸撕成小片,置于清水中浸泡 12 h 以上,使用破壁机将废纸破碎成短纤维,取干净纱布滤水后备用。

2) 胶黏剂预处理。分别称取一定量的环氧树脂和酚醛树脂,加入约 100 mL 丙酮使其充分溶解。称

取一定量的马铃薯淀粉, 配制成质量分数为 5% 的淀粉溶液, 于 95 °C 水浴锅中水浴搅拌加热 20 min, 将糊化后的淀粉与苯丙乳液混合, 以提高其黏性。

3) 生物质灰预处理。为了使生物质灰充分接触胶黏剂溶液, 提高生物质灰的吸附性, 将生物质灰与胶黏剂溶液混合, 并在转速 200 r/min 下搅拌 3 min。

1.3 复合材料的制备

1) 将纸纤维分成小块, 称取一定量的木屑。

2) 将纸纤维、木屑和生物质灰胶黏剂混合液依次混合, 为了使纸纤维充分分散, 防止水分过多造成原料的流失, 加入约 350 mL 水, 随后在转速 200 r/min 下搅拌 20 min, 使各原料充分混合。

3) 组装模具。设置预定的热压温度、时间和压力进行加热。

4) 将混合料平铺在模具底部, 对物料进行排水定型操作, 随后按照设定的热压工艺进行热压。

5) 热压完成后拆解模具, 取出试样, 将热压完成后的试样转移至烘箱中烘干。

6) 将烘干完成后的试样进行编号, 并将试样在重物下平压密封, 以待测试。

具体的制备流程见图 1。

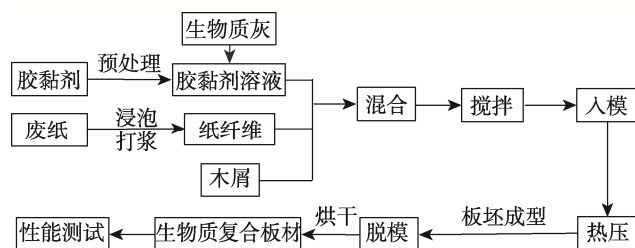


图 1 生物质复合板材的制备流程

Fig.1 Preparation flowchart of biomass composite board

1.4 测试与表征

1) 元素组成分析。将生物质灰置于 105 °C 烘箱中烘至绝干, 再研磨, 直至过 100 目筛, 然后置于 X 射线荧光光谱仪测试台上进行检测。

2) 晶体结构分析。将生物质灰研磨过 100 目筛后备用, 取少许无水乙醇将 XRD 样品台擦拭干净, 取适量样品平铺于样品台上进行制样, 完成后置于衍射仪中, 设置步长为 0.2 s/步, 衍射角度为 10°~90°, 进行 X 射线衍射测试。

3) 热稳定性分析。称取 3~10 mg 生物质灰和生物质复合板材的绝干样品, 并置于氮气气氛中, 将温度设置为 25~800 °C, 升温速率为 20 °C/min, 进行 TG-DSC 测定。

4) 微观形貌观察。取少量生物质灰和生物质复合板材的绝干样品, 通过导电胶将其黏附在 SEM 样品台上, 采用真空离子溅射设备对样品表面进行喷金, 并置于 SEM 交换室中。选择不同放大倍率和转

换角度对样品进行拍摄。

5) 抗压强度测试。参考《木材顺纹抗压强度试验方法》(GB/T 1935—2009) [20], 设置万能试验机的加载速度为 12 mm/min, 保持均匀的速度对试样施加压力, 直至试样被破坏, 以测试试样的抗压强度。性能测试结果参考《框架木箱》(GB/T 7284—2016) [21] 进行板材性能评价。

6) 抗弯强度测试。参考《木材抗弯强度试验方法》(GB/T 1936.1—2009) [22], 将试样放在万能试验机中进行三点弯曲试验, 设置加载速度为 12 mm/min, 在试样的中央保持匀速施加载荷, 直至试样被破坏, 然后测试试样的抗弯强度。参考《框架木箱》(GB/T 7284—2016) 进行板材的性能评价。

7) 弹性模量测试。参考《人造板及饰面人造板理化性能试验方法》(GB/T 17657—2013) [23], 根据前后 2 次测得的试样变形值和上下限载荷之差, 确定试样的三点弯曲抗弯弹性模量。

8) 吸水厚度膨胀率测试。参考《人造板及饰面人造板理化性能试验方法》(GB/T 17657—2013), 将试样浸泡在 (20±1) °C 水槽中, 浸泡时间为 24 h±5 min, 测量浸泡前后试样的吸水厚度膨胀率。

2 结果与讨论

2.1 生物质灰特性分析

采用 XRF、XRD 和 SEM 对生物质灰进行成分检测和微观形貌观察, 其元素组成见表 1, 物相组成见图 2, 微观形貌见图 3。

由表 1 和图 2 可知, 生物质灰的主要元素为 Si、Fe、Al、Ca, 还有少许 S、P、K、Mg 等微量元素, 主要成分为氧化硅、氧化铝、氧化铁等其他金属氧化物, 以及一些硫酸盐等盐类物质。由图 3 可知, 生物质灰的表面为多孔结构, 其表面易吸附一些微小颗粒。常用的建筑板材原材料 (如粉煤灰) 表面存在的 Si-OH 基对纤维有很强的亲和力, 其矿物纤维能够与植物纤维交织 [24], 具有 Al、Si 等活性位, 能与吸附质发生化学吸附。生物质灰与粉煤灰的成分相似, 在微观上都具有多孔结构。由此可见, 将生物质灰与废纸纤维、木屑混合制备复合材料具有一定的可行性。

2.2 纸纤维和木屑的添加量对复合板材性能的影响

采用质量分数为 30% 的生物质灰, 胶黏剂为淀粉 (质量分数 3%) 和苯丙乳液 (质量分数 7%)。为了防止因温度过高, 从而破坏糊化淀粉中的氢键, 影响淀粉的作用效果, 将热压工艺参数固定为 120 °C、4 MPa、40 min。研究了纸纤维和木屑的添加量对材料性能的影响规律, 材料的力学性能见图 4, 吸水厚度膨胀率见图 5。

表 1 生物质灰的元素组成
Tab.1 Element of biomass ash

元素	Si	Fe	Al	Ca	S	P	K	Mg	Ti	Na
质量分数/%	12.76	11.09	7.92	7.35	3.83	2.86	1.13	1.09	0.523	0.495

注：表中的 S 和 P 的含量均为生物质灰中总的含量。

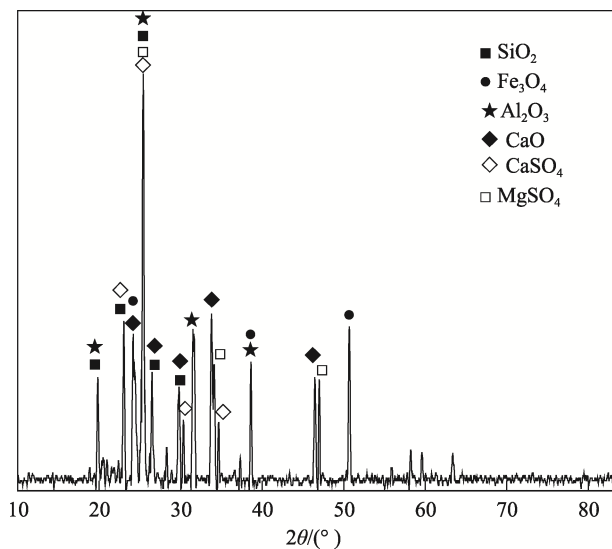


图 2 生物质灰的 XRD 图谱
Fig.2 XRD pattern of biomass ash

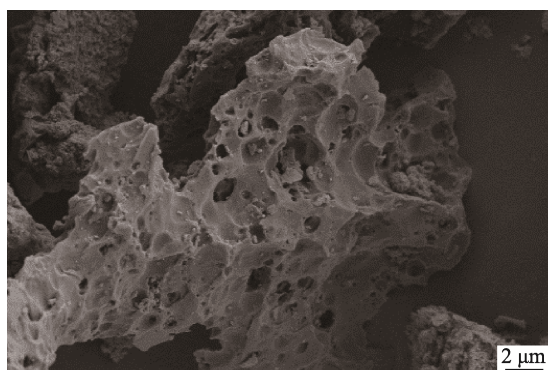


图 3 生物质灰的微观形貌
Fig.3 Microscopic morphology of biomass ash

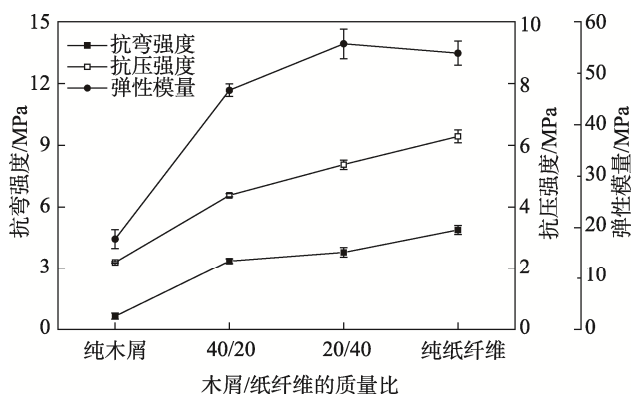


图 4 不同纸纤维和木屑质量比制备的生物质复合板材的力学性能

Fig.4 Mechanical properties of biomass composite board prepared with different paper fiber and sawdust mass ratios

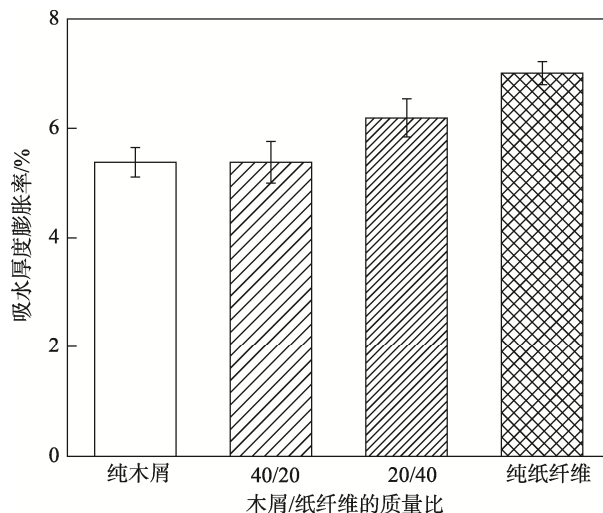


图 5 不同纸纤维与木屑质量比制备的生物质复合板材的吸水厚度膨胀率

Fig.5 Water absorption thickness swelling ratio of biomass composite board prepared with different additions of paper fiber and sawdust

由图 4 可知,材料的抗弯强度和抗压强度随着纸纤维添加量的增加而增加,材料的弹性模量则先随纸纤维添加量的增加而快速增加,当木屑/纸纤维的质量比达到 20/40 后则缓慢下降。纸纤维里含有大量的长纤维,它们会与木屑纤维通过氢键、范德华力和机械交叉等方式结合^[25],形成材料的网状基体,为生物质灰提供吸附空间。在助剂的作用下,生物质灰可以均匀地附着在纤维网状结构中^[26],从而提升材料的匀度^[27]和力学性能。由图 5 可知,不同纸纤维木屑含量的吸水厚度膨胀率为 5%~8%。纤维越多,与水分子形成的氢键也越多,就越容易吸水膨胀,因此吸水厚度膨胀率随着纸纤维添加量的增加而增加。实验结果表明,添加质量分数为 40%的纸纤维与 60%的纸纤维相比,材料的抗弯强度和弹性模量相差不大,吸水厚度膨胀率更低。从成本角度考虑,废纸的成本为木屑成本的 50 倍左右,添加部分比例的木屑可以在保证强度的同时降低材料的成本。由此,原材料的配方选择纸纤维和木屑的质量分数分别为 40%和 20%,生物质灰的质量分数为 30%。由于实验中苯丙乳液在排水过程中较易流失,不易留着在纤维的表面,材料的强度不高,因此需要探究更优的胶黏剂种类,以提升材料的性能。

2.3 胶黏剂种类对复合板材性能的影响

基于上一组研究方案,在纸纤维和木屑添加量(质量分数)为 40%和 20%,生物质灰质量分数为

30%时,保持热压工艺不变(120 °C、4 MPa、40 min),选择质量分数为 3%的淀粉+质量分数为 7%的苯丙乳液、质量分数为 10%的酚醛树脂和质量分数为 10%的环氧树脂作为胶黏剂,研究胶黏剂种类对复合板材性能的影响规律,材料的力学性能见图 6,吸水厚度膨胀率见图 7。

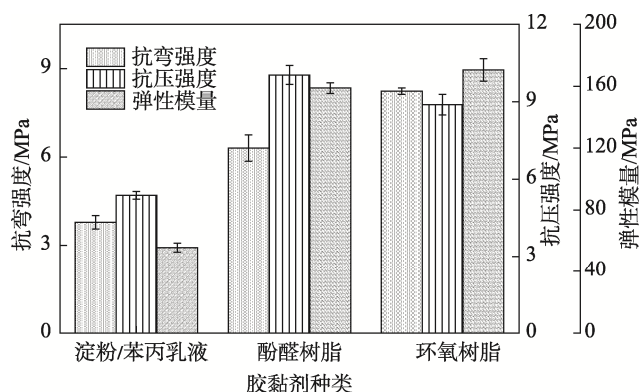


图 6 不同种类胶黏剂制备的生物质复合板材的力学性能
Fig.6 Mechanical properties of biomass composite board prepared with different kinds of adhesives

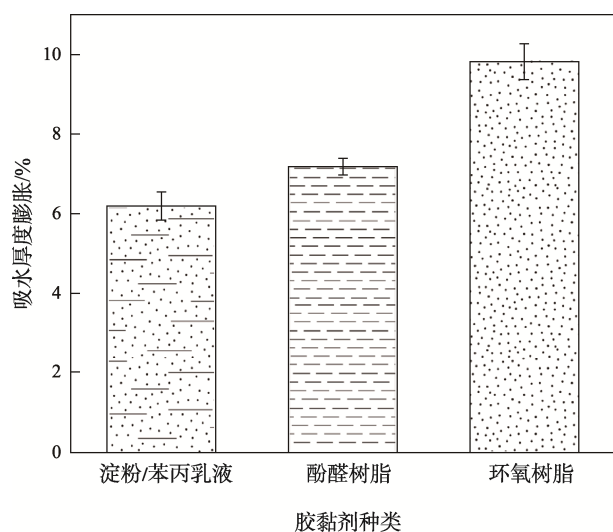


图 7 不同种类胶黏剂制备的生物质复合板材的吸水厚度膨胀率

Fig.7 Water absorption thickness swelling ratio of biomass composite board prepared with different kinds of adhesives

由图 6 可知,3 种胶黏剂制备复合板材的抗弯强度以环氧树脂的最高,酚醛树脂的次之,淀粉/苯丙乳液的最低;从抗压强度来看,酚醛树脂 > 环氧树脂 > 淀粉/苯丙乳液;从弹性模量来看,环氧树脂 > 酚醛树脂 > 淀粉/苯丙乳液。酚醛树脂和环氧树脂的抗压性能均达到了国标对于框架木箱的要求(木材的许用抗压强度需达到 7 MPa),而环氧树脂的抗弯强度和弹性模量均高于酚醛树脂的抗弯强度,从强度性能来看,环氧树脂的增强效果相对最好。由图 7 可知,3 种胶黏剂制备的复合板材的吸水厚度膨胀率均在 10%以下,环氧树脂相对最高,其次是酚醛树脂,淀

粉/苯丙乳液相对最低。环氧树脂在被固化后为三维网状结构^[28],二氧化硅可以与环氧基质界面交联^[29]。这种三维网状结构可以与更多的水分子形成氢键,故环氧树脂的吸水厚度膨胀率比其他 2 种胶黏剂的吸水厚度膨胀率高。生物质灰含有较多的二氧化硅、氧化铝等无机物,其内部结构疏松多孔,可以良好地与环氧树脂基质连接,从而表现出更高的力学性能。相较于其他 2 种胶黏剂,环氧树脂在增强机械强度方面表现得更好,吸水厚度膨胀率也较低,故应选择环氧树脂作为生物质复合板材的胶黏剂。考虑到添加环氧树脂的复合板材接近国标要求,因此在此基础上研究温度对复合板材性能的影响。

2.4 热压温度对复合板材性能的影响

基于前 2 组研究方案的纸纤维木屑配比和胶黏剂,在热压时间和压力分别为 20 min 和 4 MPa 下,研究生物质复合板材的热压温度对材料性能的影响规律,材料的力学性能见图 8,吸水厚度膨胀率见图 9。

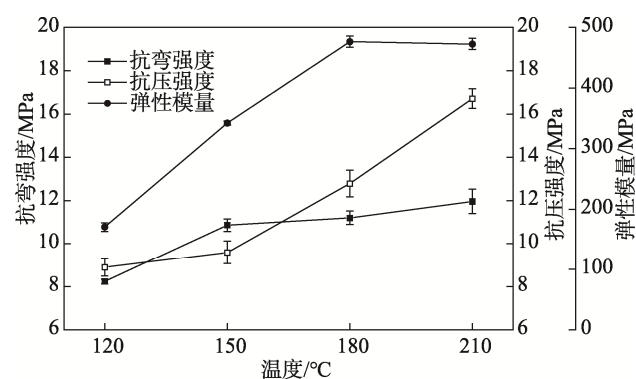


图 8 不同热压温度制备的生物质复合板材的力学性能
Fig.8 Mechanical properties of biomass composite board prepared at different hot pressing temperature

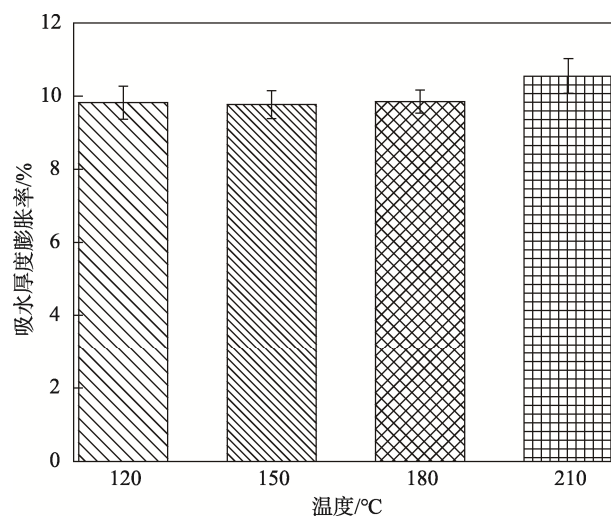


图 9 不同热压温度制备的生物质复合板材的吸水厚度膨胀率

Fig.9 Water absorption thickness swelling ratio of biomass composite board prepared at different hot pressing temperature

由图8可知,随着热压温度的增加,材料的抗压强度提升较大。随着温度的提升,材料的抗弯强度逐渐增加,当温度高于150℃时,材料的抗弯强度变化不大。当温度升高时,复合板材的弹性模量快速增加,在温度为180、210℃时,材料的弹性模量基本相同。由图9可知,在不同温度下制备的板材的吸水厚度膨胀率在10%左右,温度对吸水厚度膨胀率的影响不大。胶黏剂均为环氧树脂的情况下,材料内部的固化结构基本一致,与水分子形成的氢键数目相差不大,故吸水厚度膨胀率变化不大。当温度较低时,胶黏剂环氧树脂的固化效果不稳定,不能形成稳固的三维网状结构,通过胶黏剂连接的纤维结合效果不理想。当温度高于150℃时,胶黏剂与纤维间的连接更加紧密,随着热压温度的提升,胶黏剂形成了稳定的固化结构,纸纤维和木屑中的木质素软化变黏,形成了木质素-糠醛结构^[30],它具有自黏性,起到了一定的胶黏剂作用,材料的强度也得到提升。通过对比可知,4组实验的抗压强度均大于7 MPa,180℃和210℃组的抗弯强度均大于11 MPa,满足国标要求(木材的许用抗压强度为7 MPa,抗弯强度为11 MPa)。实验结果表明,180℃组具有更低的吸水性,且能耗更低,试样的成本更低,因此选择180℃为生物质复合板材的热压温度。

综上所述,生物质灰在制备代木包装材料方面具有可行性。通过实验得到了生物质复合板材的最佳配方工艺(添加量均以质量分数计):纸纤维的添加量为40%,生物质灰的添加量为30%,废弃木屑的添加量20%,环氧树脂的添加量为10%,热压温度为180℃,热压压力为4 MPa,热压时间为20 min,所制备材料的抗弯强度为11.2 MPa,抗压强度为12.79 MPa。对实验结果均进行了重复验证,均达到了国标规定的抗弯强度和抗压强度要求。

2.5 材料的微观形貌

生物质复合板材的平面微观形貌和截面微观形貌 SEM 图见图10。由图10可知,生物质复合板材的平面为网状分布,生物质灰均匀地吸附在纤维表面。图10b为截面 SEM 图片,可以看出,生物质复合板材的截面为层状分布,其层间分布着大量的生物

质灰颗粒。从微观形貌可以看出,少量生物质灰颗粒直接吸附在纤维上,大量的生物质灰分布在纤维空隙中。说明生物质灰可以通过自身的吸附特性直接吸附在纤维上,也可以在胶黏剂的作用下与纤维结合。采用生物质灰与胶黏剂混合制备复合板材,增大了其纤维间的接触面积,有效降低了材料的孔隙率,可以提升材料的性能,因此将生物质灰用于制备生物质复合板材可行。添加生物质灰制备的板材在满足国标要求的前提下替代木材使用,不仅提升了生物质灰的利用率,而且降低了成本,为废弃资源创造了更高的价值。

2.6 材料的热稳定性分析

将普通木材与所制备的生物质复合板材进行对比,并进行了TG-DSC检测。普通木材和生物质复合板材的DTG和DSC曲线分别见图11a—b。2种材料的质量损失均可以分为2个阶段:第1个阶段为30~150℃,DSC吸热峰值出现在100℃左右,为材料中游离水、吸附水的挥发和脱附^[31];第2个阶段为250~450℃,其中以300~400℃时质量变化最为剧烈,吸热峰值出现在370~380℃之间,这是由木材细胞壁组分纤维素、半纤维素和木质素的受热分解所致^[32]。

由图11a可知,在第2个质量损失阶段,生物质复合板材的分解温度差为56.5℃,质量损失率约为49.54%;普通木材的分解温度差为96.8℃,质量损失率约为64.32%。这说明生物质灰的添加使复合板材的分解时间变短、质量损失更少。由图11b可知,在室温到800℃内,生物质复合板材的吸热峰面积比普通木材的吸热峰面积小,生物质复合板材在2个质量损失阶段的吸热峰值温度分别为98.13、371.8℃;普通木材的2个吸热峰值温度分别为105.2、382.4℃。复合板材峰值温度的前移可能是因在热压条件下,复合板材内部的半纤维素、纤维素部分分解,产生了易热解的小分子糖类^[33]。对比生物质复合板材与普通木材的质量变化可知,生物质复合板材的质量损失率约为57.65%,小于普通木材的质量损失率(80.02%)。由此可见,生物质灰的添加降低了复合板材的质量损失率,提升了板材的热稳定性。

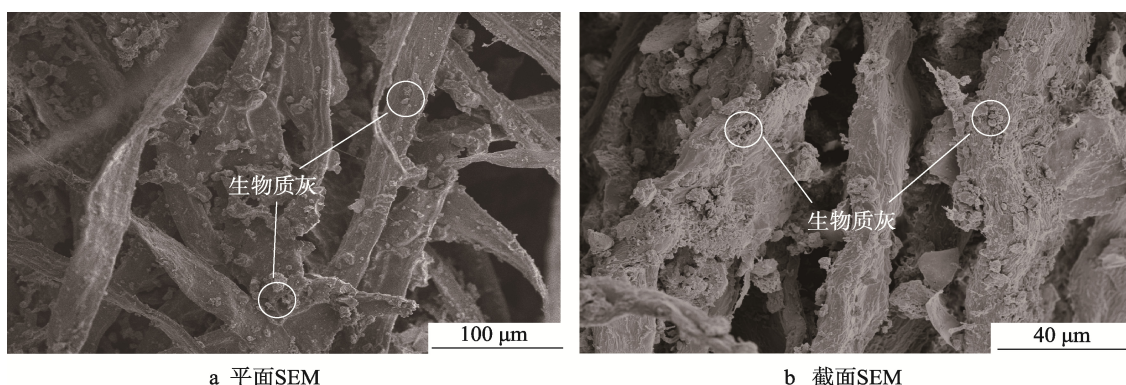


图10 生物质复合板材的 SEM 图片
Fig.10 SEM images of biomass composite board

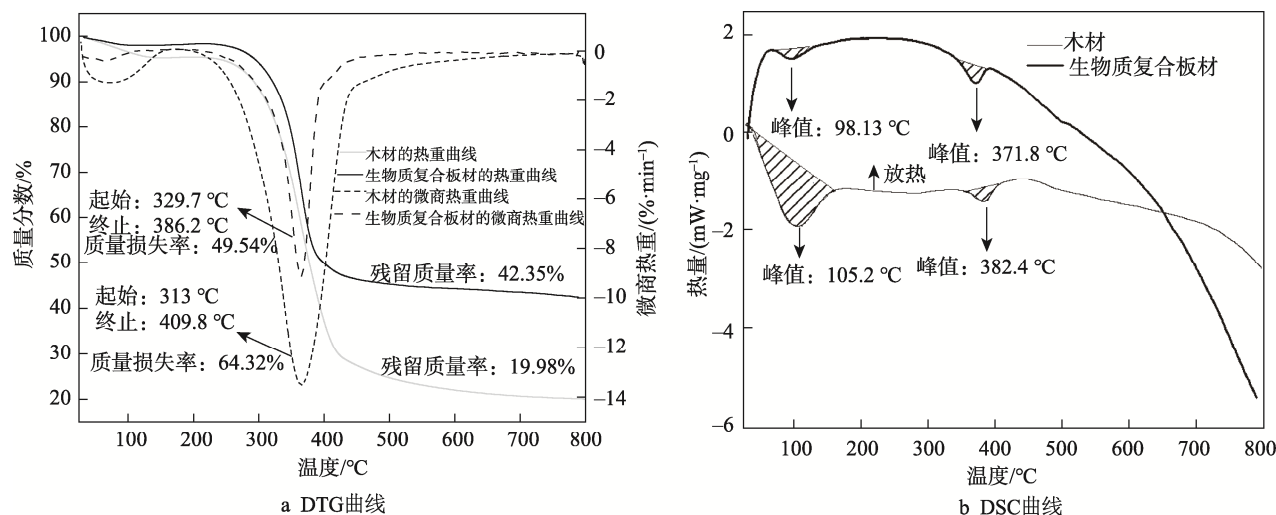


图 11 普通木材和生物质复合板材的 DTG 和 DSC 曲线
Fig.11 DTG and DSC curves of ordinary wood and biomass composite board

3 结语

生物质灰主要由无机物组成, 包括二氧化硅、氧化铝、氧化铁、氧化硅等物质, 与粉煤灰在组成成分和结构上相似, 因此将生物质灰用于制备新型复合板材具有一定的可行性。

根据实验结果得到了生物质复合板材的最佳配方工艺 (添加量均以质量分数计): 纸纤维的添加量为 40%, 生物质灰的添加量为 30%, 废弃木屑的添加量为 20%, 环氧树脂的添加量为 10%, 热压温度为 180 °C, 热压压力和时间分别为 4 MPa、20 min。所制备材料的抗弯强度为 12.79 MPa, 抗压强度为 11.2 MPa, 达到了《框架木箱》(GB/T 7284—2016) 中规定的抗弯强度和抗压强度要求。

SEM 结果表明, 生物质复合板材平面为网状结构, 截面为层状结构, 其层间分布着大量的生物质灰颗粒, 生物质灰的添加有效降低了材料的孔隙率, 因此将生物质灰用于制备生物质复合板材可行。TG-DSC 结果表明, 添加了生物质灰的复合板材比普通木材具有更好的热稳定性。

参考文献:

- [1] DYNA T, EDDINE E M N, GERARD A, et al. Fiberboards Made from Corn Stalk Thermomechanical Pulp and Kraft Lignin as a Green Adhesive[J]. BioResources, 2017, 12(2): 2379-2393.
- [2] GARCIA-GARCIA D, QUILES-CARRILLO L, MONTANES N, et al. Manufacturing and Characterization of Composite Fibreboards with Posidonia Oceanica Wastes with an Environmentally-Friendly Binder from Epoxy Resin[J]. Ma-

terials, 2017, 11(1): 35.

- [3] THENG D, ARBAT G, DELGADO-AGUILAR M, et al. Comparison between Two Different Pretreatment Technologies of Rice Straw Fibers Prior to Fiberboard Manufacturing: Twin-Screw Extrusion and Digestion Plus Defibrillation[J]. Industrial Crops and Products, 2017, 107: 184-197.
- [4] AWAD S, HAMOUDA T, MIDANI M, et al. Date Palm Fibre Geometry and Its Effect on the Physical and Mechanical Properties of Recycled Polyvinyl Chloride Composite[J]. Industrial Crops and Products, 2021, 174: 114172.
- [5] 朱凌波, 李新功, 杨凯, 等. 几种不同改性剂对稻草/丙烯腈-丁二烯-苯乙烯复合材料性能的影响[J]. 复合材料学报, 2018, 35(7): 1791-1799.
ZHU Ling-bo, LI Xin-gong, YANG Kai, et al. Performance Enhancement of Straw/Acrylonitrile- Butadiene-Styrene Composites Modified by Several Different Kinds of Modifiers[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2018, 35(7): 1791-1799.
- [6] 王凯文, 杨蕊, 叶芑, 等. 大豆与木片共磨制备无胶纤维板的工艺研究[J]. 包装工程, 2019, 40(7): 81-87.
WANG Kai-wen, YANG Rui, YE Peng, et al. Process of Preparing Glueless Fiberboard by Co-Milling of Soybean and Wood Chips[J]. Packaging Engineering, 2019, 40(7): 81-87.
- [7] 潘青青, 吴定橙, 单伟雄, 等. 添加花生秸秆的无胶纤维板的制备工艺及优化[J]. 包装工程, 2020, 41(11): 127-134.
PAN Qing-qing, WU Ding-cheng, SHAN Wei-xiong, et al. Preparation Technology and Optimization of Peanut Straw Fiberboard without Adhesive[J]. Packaging En-

- gineering, 2020, 41(11): 127-134.
- [8] 陈瑞建, 章伟伟, 关丽涛, 等. 纸片规格和添加量对木/纸复合刨花板性能的影响[J]. 木材工业, 2019, 33(1): 8-11.
CHEN Rui-jian, ZHANG Wei-wei, GUAN Li-tao, et al. Effects of Waste Newspaper on Properties of Wood/Paper Composite Panels[J]. China Wood Industry, 2019, 33(1): 8-11.
- [9] DUKARSKA D, BUSZKA K, MODZELEWSKA I. Kraft Scrap Paper Pulp as a Substitute of Wood Chips in Manufacture of Particleboards Resinated with Hybrid PF/PMDI Resin[J]. Maderas: Ciencia y Tecnología, 2018, 20: 161-170.
- [10] 马舒慧, 郭玉花, 魏占锋, 等. 聚乙烯/杨木粉基木塑复合材料的性能研究[J]. 包装工程, 2021, 42(21): 93-97.
MA Shu-hui, GUO Yu-hua, WEI Zhan-feng, et al. Properties of Polyethylene/Poplar Powder Based Wood Plastic Composites[J]. Packaging Engineering, 2021, 42(21): 93-97.
- [11] KISHORRAO G O, MANORANJAN B, SMITA M, et al. Effect of Silane Treated Fly Ash on Physico-Mechanical, Morphological, and Thermal Properties of Recycled Poly(Vinyl Chloride) Composites[J]. Journal of Applied Polymer Science, 2020, 138(19): 1-14.
- [12] PURI V, CHAKRABORTTY P, ANAND S. Flexural Behavior of Bamboo Reinforced Wall Panels with Varying Fly Ash Content[J]. Magazine of Concrete Research, 2019, 72(9): 1-51.
- [13] CHITHAMBARAM S J, KUMAR S. Flexural Behaviour of Bamboo Based Ferrocement Slab Panels with Flyash[J]. Construction and Building Materials, 2017, 134: 641-648.
- [14] GOHATRE O K, BISWAL M, MOHANTY S, et al. Study on Thermal, Mechanical and Morphological Properties of Recycled Poly(Vinyl Chloride)/Fly Ash Composites[J]. Polymer International, 2020, 69(6): 552-563.
- [15] 孙红娟, 曾丽, 彭同江. 粉煤灰高值化利用研究现状与进展[J]. 材料导报, 2021, 35(3): 3010-3015.
SUN Hong-juan, ZENG Li, PENG Tong-jiang. Research Status and Progress of High-Value Utilization of Coal Fly Ash[J]. Materials Reports, 2021, 35(3): 3010-3015.
- [16] 冀文文, 李静一, 尚中博, 等. 生物灰综合利用的研究进展[J]. 河南大学学报(自然科学版), 2017, 47(4): 453-463.
JI Wen-wen, LI Jing-yi, SHANG Zhong-bo, et al. The Progress on the Comprehensive Utilization of Biomass Ash[J]. Journal of Henan University (Natural Science), 2017, 47(4): 453-463.
- [17] 黄奎霖, 韩奎华, 齐建荟. 煤灰和生物质灰的组成及灰熔点预测研究进展[J/OL]. 洁净煤技术: 1-17[2022-03-08]. DOI:10.13226/j.issn.1006-6772.21120703.
HUANG Kui-lin, HAN Kui-hua, QI Jian-hui. Research Progress on Composition and Ash Melting Point Prediction of Coal Ash and Biomass Ash[J/OL]. Clean Coal Technology: 1-17[2022-03-08]. DOI:10.13226/j.issn.1006-6772.21120703.
- [18] 殷立宝, 邓昌亚, 张成, 等. 工业、生活污水与煤混合燃烧的灰熔特性研究[J]. 燃料化学学报, 2014, 42(9): 1068-1076.
YIN Li-bao, DENG Chang-ya, ZHANG Cheng, et al. Fusion Characteristics in Co-Combustion of Coal with Industrial and Municipal Sludge[J]. Journal of Fuel Chemistry and Technology, 2014, 42(9): 1068-1076.
- [19] MUNAWAR M A, KHOJA A H, NAQVI S R, et al. Challenges and Opportunities in Biomass Ash Management and Its Utilization in Novel Applications[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2021, 150: 111451.
- [20] GB/T 1935—2009, 木材顺纹抗压强度试验方法[S].
GB/T 1935-2009, Method of Testing in Compressive Strength Parallel to Grain of Wood[S].
- [21] GB/T 7284—2016, 框架木箱[S].
GB/T 7284-2016, Wooden Framed Case[S].
- [22] GB/T 1936.1—2009, 木材抗弯强度试验方法[S].
GB/T 1936.1-2009, Method of Testing in Bending Strength of Wood[S].
- [23] GB/T 17657—2013, 人造板及饰面人造板理化性能试验方法[S].
GB/T 17657-2013, Test Methods of Evaluating the Properties of Wood-Based Panels and Surface Decorated Wood-Based Panels [S].
- [24] 逢锦江, 赵传山. 硅酸铝纤维作为造纸填料的可能性探讨[J]. 中国造纸, 2010, 29(4): 27-31.
PANG Jin-jiang, ZHAO Chuan-shan. The Application of Aluminum Silicate Fiber as Filler in Papermaking[J]. China Pulp & Paper, 2010, 29(4): 27-31.
- [25] ZHOU Yong-hui, FAN Mi-zi, CHEN Li-hui. Interface and Bonding Mechanisms of Plant Fibre Composites: An Overview[J]. Composites Part B: Engineering, 2016, 101: 31-45.
- [26] 曹延芬, 卫灵君, 卢莉璟, 等. 利用生物质颗粒制备纸包装材料[J]. 材料科学与工程学报, 2021, 39(1): 135-140.
CAO Yan-fen, WEI Ling-jun, LU Li-jing, et al. Paper Packaging Materials Prepared by Introducing Granular

- Biomass[J]. Journal of Materials Science and Engineering, 2021, 39(1): 135-140.
- [27] HUBBE M A, PAWLAK J J, KOUKOULAS A A. Paper's Appearance: A Review[J]. BioResources, 2008, 3(2): 627-665.
- [28] 李苗苗, 陈平, 王辉, 等. 粉煤灰微珠填充环氧树脂复合涂层耐磨性能的研究[J]. 材料导报, 2017, 31(4): 36-40.
- LI Miao-miao, CHEN Ping, WANG Hui, et al. Wear Resistance of Fly Ash Cenospheres/Epoxy Resin Composite Coating[J]. Materials Review, 2017, 31(4): 36-40.
- [29] RAFIQUE I, KAUSAR A, MUHAMMAD B. Epoxy Resin Composite Reinforced with Carbon Fiber and Inorganic Filler: Overview on Preparation and Properties[J]. Polymer-Plastics Technology and Engineering, 2016, 55(15): 1653-1672.
- [30] 潘青青, 吴定橙, 单伟雄, 等. 农产品加工废弃植物纤维利用现状及其在热压成型技术上的应用研究进展[J]. 食品工业科技, 2019, 40(9): 357-362.
- PAN Qing-qing, WU Ding-cheng, SHAN Wei-xiong, et al. Research Progress of Utilization of Waste Plant Fibers in Agricultural Products Process and Its Application in Hot Pressing Technology[J]. Science and Technology of Food Industry, 2019, 40(9): 357-362.
- [31] 怀超平, 刘芳, 董佩文, 等. 木材热重试验及动力学分析[J]. 消防科学与技术, 2020, 39(6): 757-760.
- HUAI Chao-ping, LIU Fang, DONG Pei-wen, et al. Thermogravimetric Experiment and Kinetic Analysis of Wood[J]. Fire Science and Technology, 2020, 39(6): 757-760.
- [32] 陈世尧, 袁光明, 杨涛, 等. 壳聚糖-SiO₂ 仿生物矿化协同改性尾巨桉木材[J]. 材料导报, 2020, 34(10): 10182-10186.
- CHEN Shi-yao, YUAN Guang-ming, YANG Tao, et al. Synergistic Modification of Eucalyptus Urophylla Wood by Chitosan-SiO₂ Biomimetic Mineralization[J]. Materials Reports, 2020, 34(10): 10182-10186.
- [33] 郑霞. 非木材植物无胶碎料板喷蒸热压工艺及胶合机理研究[D]. 长沙: 中南林业科技大学, 2012: 128-131.
- ZHENG Xia. Research on Steam-Injection Hot-Pressing Technology and Bonding Mechanism of Non-Wood Plant Binderless Particleboard[D]. Changsha: Central South University of Forestry & Technology, 2012: 128-131.

责任编辑: 彭颀