

秸秆高效利用及其制板工艺的研究进展

汪嘉君, 倪林, 刘君良*

(中国林业科学研究院木材工业研究所, 北京 100091)

摘要: 农作物秸秆人造板的使用不仅填补了我国因木质资源短缺造成木基人造板供不应求的现状, 还可以减少因焚烧秸秆带来的环境污染等危害。但是秸秆制板工艺受到胶黏剂和秸秆自身特性的限制。通过综述秸秆资源的利用方式, 原料特性和使用不同胶黏剂秸秆人造板的研究进展和现状, 分析现状总结了秸秆人造板生产中在储运、工艺和胶黏剂的选择中存在的问题, 最后指出秸秆人造板的发展方向, 为秸秆人造板的进一步研究提供参考。

关键词: 农作物秸秆; 胶黏剂; 制板工艺; 无胶人造板

中图分类号: X712; TS653

文献标识码: A

文章编号: 1672-352X (2018)01-0117-06

Research progress in effective utilization of straw and straw-board manufacture technology

WANG Jiajun, NI Ling, LIU Junliang

(Research Institute of Wood Industry, Chinese Academy of Forestry, Beijing 100091)

Abstract: The use of agricultural straw-based panel can not only fill the gap of short supply of wood-based panels caused by the shortage of wood resource, but also reduce the environmental pollution and other hazards caused by burning straw. The adhesive performance and the quality of straw are the key factors restricting the performance of straw-board. In this paper, we summarized the research progress and the status in the use patterns and characters of straw and straw-board with different kinds of adhesives. We also analyzed the existing problems in the panel manufacture, including problems in storage, technology and choice of adhesive. Finally, we provided the direction in future manufacture of the straw-board.

Key words: agricultural straw; adhesive; manufacture technology; binderless boards

中国是农业大国, 秸秆产量居世界首位。根据联合国粮农组织, 全球每年秸秆总产量为 50.81 亿 t, 其中中国秸秆产量为 9.4 亿 t, 主要是水稻、玉米和小麦。秸秆作为农作物副产品, 是一种可以综合利用的可再生资源^[1]。

随着农业生产和农村经济的发展, 农作物秸秆大量剩余, 长期在田间焚烧和废弃等未利用的达到 2.15~3.14 亿 t^[2-3], 不仅造成资源严重浪费, 还导致空气污染, 出现严重雾霾。在造成环境污染的同时, 还给交通安全带来巨大的压力。秸秆处理问题日益突出, 特别在粮食主产区和经济较发达地区, 农民为抢种, 直接在田间焚烧秸秆, 造成了严重的环境问题。另外, 秸秆的综合利用效率低已经成为农业转型升级的重要影响因素。2008 年 7 月 27 日,

国务院办公厅发表了“关于加快推进农作物秸秆综合利用的意见”。对秸秆的充分、高效利用, 符合循环经济及可持续发展的要求, 秸秆工业化利用将会带来巨大的经济效益、社会效益和生态效益。

1 秸秆资源的利用

传统的秸秆综合利用的主要途径有肥料化利用、能源化利用、饲料化利用和工业原料化利用等。秸秆肥料化利用是将秸秆还田以改善土壤理化性状, 提高土壤肥力, 但是秸秆的有些部分不易腐烂, 过量还田会对土壤有副作用, 影响播种。秸秆能源化利用主要途径有直燃技术、沼气和发电等, 直接燃烧效率低, 其他能源化利用尚未大规模推广。而将农作物直接作为家畜饲料, 其蛋白质、可溶性碳水化合物等有益成分含量低, 粗纤维含量高。因

收稿日期: 2017-05-25

作者简介: 汪嘉君, 博士研究生。E-mail: wangjiajun@caf.ac.cn

* 通信作者: 刘君良, 研究员, 博士生导师。E-mail: liujunliang@caf.ac.cn

此秸秆的工业原料化利用对于提高产品附加值,改善生态环境具有重要意义。

多年来,非木质资源一直是制浆工业的重要原料之一,但是随着非木浆的清洁生产任务严峻,从2004年1 180万t降到2014年的755万t,特别是麦稻草浆,从2004年的900万t降到2014年的336万t。2013年农业秸秆原料只占我国制浆原料的4.8%左右,这使得我国农村秸秆资源富余量大大增加。针对农业废弃秸秆的综合利用问题,近期,中国工程院8位院士和近10名中国轻工业联合会的专家,联名向相关部门提出了“推广先进技术模式利用农业秸秆制浆造纸的建议”,在建议中认为:利用农业秸秆清洁制浆并生产制备纤维制品是大量消耗农业秸秆的重要途径^[4]。

2 秸秆原料的特性

秸秆,以麦秸为例,学名 *Triticum aestivum* Linn., 结构见图1,是生产迅速,储量丰富的农业副产品,比如在德国每年有1 000万t左右的麦秸资源未被还田^[5]。秸秆资源的非纤维细胞含量大于50%,远大于木材的非纤维细胞含量(见表1)。一年生禾本科植物有丰富的生物质,主要由纤维素,半纤维素和木质素组成。纤维素是网络骨架,嵌入在半纤维素和木质素基质中。这样的结构阻碍了工业化的生物转化利用^[6]。还包含少量的糖、油脂物、蜡,灰分中的硅、单宁、色素和有机氮化物等。由于秸秆难以工业化利用,以及日益严重的温室效应和石油资源的枯竭^[7-9],美国林产品实验室的Rowell^[10]对多种秸秆进行纤维性能和成分比较分析,可知采用秸秆资源等非木材植物制浆生产纤维产品在技术上是可行的,产品质量不亚于木材原料的纸浆或纤维板,故可称秸秆原料是很有发展潜力的纤维板生产资源^[11]。

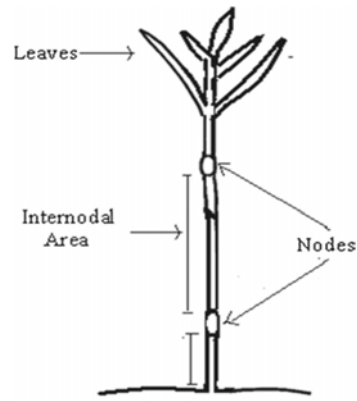


图1 麦秸的结构

Figure 1 Wheat straw structure

虽然秸秆具有产量大,种植面广,易收集和价格低廉等优势,并且在制浆和板材的生产中,动力损耗比木材原料低。但是秸秆原料还具有以下缺点:

(1) 秸秆灰分中非极性物质的二氧化硅含量很高,硅物质使得在制浆过需要额外的特殊处理和花费更多成本,同时,在人造板生产中这些物质的存在对刀具、磨片以及砂带的磨损带来不利的影响,还会影响纤维间的胶合性能,传统的胶黏剂性能差,胶合性能较好的异氰酸酯胶黏剂(MDI)成本高且脱模困难^[11-12];

(2) 秸秆外表皮含有蜡质,这给原料制备工序以及产品都会带来不利的影响,这是因为麦秸表面角质层阻碍了胶滴润湿、扩散以及渗透^[13];

(3) 虽然秸秆原料的纤维形态和化学成分与木材原料相似,可是其所含的糖类物质和浸提物高于木质材料,所以在制浆成板过程中还要考虑到防腐、防霉、防变色以及防火等措施;

(4) 非木材植物原料具有一定的季节性,质地蓬松、运输成本较高、贮存难度大。

结合秸秆的特性,在生产工艺、胶黏剂的选择和设备改进优化等方面需要进行改革^[14]。

表1 秸秆与几种木材细胞形态对比

Table 1 Comparison the cell morphology of straw with several kinds of woods

原料 Raw material	纤维细胞 Fiber cell	薄壁细胞 Parenchyma cell		导管 Vessel	表皮细胞 Epidermal cell	其他 Others	%
		杆状 Rod	非杆状 Non-rod				
稻草 Rice straw	46.0	6.1	40.4	1.3	6.2		
麦秸 Wheat straw	62.1	16.6	12.8	4.8	2.3	1.4	
马尾松 Pinus massoniana	98.5		1.5				
落叶松 Larch	98.5		1.5				
红松 Pinus koraiensis	98.5		1.8				

3 秸秆人造板的研究现状

我国秸秆人造板的研究起步较晚,始于20世纪

70年代,发展快。已成功研制秸秆刨花板、秸秆纤维板、草/木复合中密度纤维板、软质秸秆板、轻质复合墙体材料、秸秆炭和秸秆/塑料复合材料等多种

秸秆产品。20 世纪 90 年代末期开始进行秸秆人造板的工业化生产^[15-16]。截至目前,我国秸秆板产能已达 $50 \times 10^4 \text{ m}^3 \cdot \text{a}^{-1}$, 生产线主要分布在江苏、湖北、四川、山东和陕西等地区^[17]。秸秆人造板用胶黏剂中,不同种类的胶黏剂对秸秆单元的胶合质量有所差异,不仅要保证秸秆人造板的强度,还要确保最终产品和生产过程中对人体和环境无危害。秸秆与木材存在很大的差异,表面的蜡质层和较高的硅含量对人造板质量有很大的影响。所以胶黏剂的选择和秸秆单元的预处理是制造秸秆人造板的主要研究方向。用于秸秆的胶黏剂主要有合成树脂胶黏剂、无机胶黏剂和生物胶黏剂。此外,也有研究者研究生产秸秆无胶人造板的工艺和应用。

3.1 合成树脂胶黏剂秸秆人造板

秸秆人造板的发展可追溯到 20 世纪 40 年代。近些年,使用合成树脂胶黏剂对秸秆人造板的生产研究仍在继续。常用的合成树脂胶黏剂主要有酚醛树脂胶黏剂(PF)、脲醛树脂胶黏剂(UF)、异氰酸酯胶黏剂(MDI)和一些改性的树脂胶黏剂等。

Boquillon 等^[18]分别使用 UF 和聚对苯二甲酸酯(PTP)为胶黏剂,借鉴木材刨花板的生产工艺,制造密度为 $0.7 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ 麦秸刨花板。UF 麦秸刨花板的内结合强度(IB)和吸水厚度膨胀率(TS)差,使用 PTP 制备出的麦秸刨花板的 IB 增大了 14 倍,TS 减小了 81.67%,产品性能可达到法国刨花板行业标准。这是因为 UP 与麦秸的相容性差,接触角为 84° ,而 PTP 对麦秸有较好的润湿性,接触角为 57° 。由于 PF、UF 和三聚氰胺-尿素树脂胶黏剂(MUF)制板都很难达到满意的物理力学性能, Halvarsson 等^[19-20]对使用改性三聚氰胺脲醛树脂(UMF)制造麦秸中密度纤维板。具体的实验方法是:先对麦秸秆纤维进行机械预处理,再利用热水蒸气和硫酸酸性处理,这不仅使麦秸结构变得蓬松,还降低了树脂固化的 pH 值。生产出来的纤维板密度高于 $0.78 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$,树脂含量大于 14%,达到了木材复合板英国标准水平。

对秸秆的预处理方法也影响板材的性能,如 Zhu 等^[21]对麦秸原料进行碱处理后,麦秸纤维表面易被胶滴浸润,有利于化学键合。这表明了碱处理可以增加麦秸表面活性,从而提高胶合性能。

Dumitru 等^[22]将麦秸和增强环氧树脂(EP)分别在 4 种不同空间取向(单向、正交、随机、特定)下进行复合固化,结果发现人造板的抗拉强度和弹性模量都有一定程度的增大,可知秸秆的铺装方式影响了板材的机械性能。

合成树脂胶黏剂虽然具有较好的胶合性能,但是制备成本高,释放游离甲醛造成的环境污染已经成为广泛关注的社会问题。

3.2 秸秆无机人造板

无机人造板是以无机物作为胶黏剂,常见类型有硅酸盐无机板、氯氧镁水泥板、粉煤灰板和石膏板等。秸秆无机人造板从根本上解决游离甲醛的危害,其具有阻燃、防水、防腐和耐水的优良特性,但是胶合初始强度低,固化时间长,板材耐水性能差,易受潮翘曲变形,有返卤返白的缺陷。

单组分的无机胶黏剂使用性能较差,所以常将无机胶黏剂混合或改性使用。朱晓丹^[23]使用氯化镁、氧化镁和硅酸钠为胶黏剂(固含量: 66.2%; 密度: $1.6 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$),并添加磷酸三钠和硫酸亚铁等改性剂,分析了稻草刨花形态、胶草比、密度和板材结构对秸秆板物理力学性能的影响,结果生成的板材与杨木单板复合制成产品可作为环保地板使用。刘德军等^[24]使用无机(硫酸镁、碳酸镁和活性硅等)和有机凝胶材料(豆胶和改性 MDI)混合制成新型胶黏剂,再与秸秆碎料搅拌、铺装、热压成型制板,在无机和有机材料质量比为 4:1,胶草比为 0.65:0.35, $100 \sim 120^\circ\text{C}$, 80 Mpa 条件下热压 3 min 制成的秸秆无机人造板达到中密度纤维板的国家标准。

吴义强等^[25]使用等离子体、微波、物理和化学等处理方法对秸秆纤维和无机胶黏剂的界面进行调控,秸秆纤维平均相对自由基浓度降低了 42.5%,胶合强度提高 38%。

成型常采用热压工艺,但温度过高会降低制品的机械强度。符杉等^[26]将麦秸碎料和无机胶黏剂通过冷压成型工艺制备麦秸无机碎料板,随胶草比和密度的增加,界面接合性能变好,界面摩擦阻力增大,板材力学性能变好,热稳定性增加。吴义强等^[27]、凌启飞等^[28]在冷压板坯时,喷射 CO_2 气体,不仅可以缩短加压周期,还可以改善制品力学性能。

在以后的研究工作中,需要加强对秸秆无机纤维板的性能改良、加工设备和应用方面的研究,生产出应用范围广、性能良好的低密度秸秆无机人造板。

3.3 生物秸秆人造板

生物秸秆人造板使用天然高分子化合物作为胶黏剂的主要成分,常用的类型有淀粉类、蛋白类和纤维素类等。生物胶黏剂作为历史上最早使用的黏结材料,制备的秸秆人造板在耐水性能、胶合强度等指标上有很大的缺陷^[29],随着人们绿色环保意识

的加强,近年来,对生物秸秆人造板的研究和利用增多。

王敏等^[30]比较了海藻酸钠、瓜尔胶、淀粉胶和植物蛋白胶,采用20%质量分数的生物胶与秸秆粉末混合,并加入2%防水剂甘油,热压成板。麦秸与植物蛋白胶和瓜尔胶基体的界面模糊,被基体包裹较好。而海藻酸钠和淀粉胶麦秸板的界面胶合性能差,存在明显界限,两相界面空穴和缺陷多。植物蛋白胶麦秸板的力学性能与塑料复合材料相对,但是吸湿性有待提高。

时君友和汤芸芸^[31]使用玉米淀粉为主要原料,加入3%的改性水性高分子异氰酸酯胶,在160℃,3.5 MPa的条件下热压15 min,制成的0.7 g·cm⁻³的稻秸人造板的各项理化性能均能达到GB/T 4897.3-2003^[32]标准。Cheng等^[33]利用尿素对大豆面粉胶进行改性处理,再加入0.4%的硫代磷酸胺制备麦秸板,随硫代磷酸胺含量的增大,板材的吸水膨胀率越小。Leiva等^[34]也得出相似的结果,使用碱性大豆浓缩蛋白胶、PF、UF和改性前的大豆胶压制稻壳颗粒人造板,测试结果表明PF板胶黏强度和耐水性较好,改性大豆蛋白胶的WA、TS、MOE、MOR和IB较改性前变好,与UF胶板性能相近,且尺寸稳定性较优。张亚慧等^[35]对大豆胶进行酸化处理,大豆胶的颜色随pH的降低变浅,粘度先上升再下降,可以在不影响大豆蛋白胶胶合强度的同时对其颜色进行改良。

3.4 秸秆无胶人造板

胶黏剂的选择是秸秆人造板生产的关键问题,尽管合成树脂胶黏剂有很多优良性能,但是释放出的游离甲醛对环境和人体有很大的危害。因此,探索新型胶黏剂及胶合方法受到国内外研究者的重视。其中,无胶人造板可以降低生产成本,消除环境危害,简化生产过程,具有极大的发展潜力。无胶人造板依靠活化剂、催化剂等方法对原料基本单元进行活化,使得原料单元粘合成板,并且通过热压,使单元之间紧密接触。解决人造板基本单元的界面活化和胶黏物质的形成问题是实现无胶胶合的所需要关注的。在特定的压力,温度和催化剂等条件下进行物质转化,从而使界面性质产生变化,实行胶结。

早在1982年,Mobarak等^[36]将气干甘蔗及其渣芯在不同条件置于密闭模具中热压,发现在热压过程中发生了自胶合,而且生产出的产品密度高,类似塑料。可见碎料之间的紧密程度对无胶胶合有很重要的作用。

不同的预处理方法对秸秆无胶人造板的性能有重要影响。任博文^[37]利用碱溶液活化法制备无胶胶合板,即将稻草与碱木素混合后,由于结构中含有大量苯酚结构单元会对稻草及麦草的结构单元起到活化作用。在热压过程中,稻草、麦草秸秆自身结构中的木素发生热解,加之碱木素的邻苯二酚结构,在热压过程中反应生成脱甲基木素,改善了碎料分子的均一性,在一定程度上也促进了碎料纤维之间的结合程度。Luo等^[38]使用热水预处理稻秸,用于制作无胶颗粒人造板,温度、反应时间以及化学试剂作为变量。结果表明,热水预处理对生产稻秸无胶板的物理机械性能有显著影响;静曲强度、内结合强度明显增大,吸水率减小;当温度为170℃、处理15 min时,板材性能最佳。与水热处理法相比,酶活化法在无胶胶合中反应环境更温和。张亚卓^[39]以麦秸为基材,采用漆酶水浴和喷淋两种预处理方式后得到改性的秸秆纤维单元,热压制备麦秸无胶纤维板,研究表明添加一定量的木纤维有助于提高无胶纤维板的强度。内结合强度受预处理影响较大,这是因为漆酶提高了麦秸纤维表面活性,促进木素的降解生成含有酚羟基的物质,并在热压和酸性条件下产生单糖类物质,此类物质缩聚,具有一定的胶合作用。

无胶中密度纤维板多采用湿法制浆,Fahmy等^[40]使用大于1 mm的棉秆颗粒,在最高温度160℃下热压制成4 mm厚的硬质纤维板。测试板材的抗弯强度、水分含量等参数。板材的抗弯强度可达到63.70 MPa,水分含量最低为12.1%,所以可以通过干法制浆无胶热压成板的方法制备出具有一定机械强度的硬质纤维板。

关于胶合机理的几种可能的解释分别是:木质素-糠醛聚合物^[41]、木质素缩合反应^[42];糠醛的化学反应^[43],而且木质素受热软化的物理现象也被认为是纤维板制成的原因之一^[44]。事实上,根据原材料和制造工艺的不同,其无胶胶合机理都不相同。结合新型的分析手段,如利用化学分析光电子能谱(ESCA)、傅里叶红外光谱(FTIR)、电子自旋共振波谱(ESR)、差示扫描量热分析(DSC)、扫描电子显微镜(SEM)等对材料的表面和化学成分进行分析,可进一步研究胶合机理,可为提高秸秆无胶人造板性能提供理论基础。

4 存在问题

4.1 秸秆的储存、运输

秸秆季节性很强,一年生的植物,资源分布广

且质轻体积蓬松,这也给秸秆原料的收集和储存带来了不便,秸秆资源贮存量和贮存方式随生产规模、原料种类及收购季节偶有差异。如当地农民有收集秸秆的习惯,特别是部分农户将秸秆压缩打包后进行仓储,用于之后持续性的秸秆工业化利用为宜。此外,秸秆资源的堆放方式和堆垛规格也很重要,过高会发生堆垛倾斜倒塌,过低占用场地过大,要留有充分的通风、运输及防火通道。

4.2 胶黏剂的选择

合成树脂胶黏剂、无机胶黏剂和生物胶黏剂在秸秆人造板的生产中各有利弊。例如,异氰酸酯的产品无甲醛释放,性能优于脲醛树脂的产品,但是经过估算,在同等用量下,异氰酸酯胶黏剂的成本是脲醛树脂胶黏剂的 10 倍。

所以应当结合秸秆原料的特性,选择不同的胶黏剂和加工工艺,制备符合国家标准的人造板,最大程度上实现社会、环境和经济效益的多赢。

4.3 秸秆人造板的性能

秸秆原料在某些方面存在不足,产品耐水、防腐和防腐性能较差,应用范围有限。为了需要克服秸秆原料在某些方面的不足,可通过特殊的加工工艺进行改良,以拓展板材性能,赋予其特殊的功能。

针对不同种类秸秆资源的特性和应用领域,改性剂的选择需要注意到成本和环保的问题。

4.4 无胶胶合技术的选择

虽然无胶人造板的研究已经持续很多年,但在纤维制造、加工工艺、胶合机理以及无胶人造板的功能化研究还有很大的进步空间。其研究与讨论还局限于实验室水平,最主要的是其制造工艺中无胶胶合的机理难以得到很好的解释。

5 展望

秸秆资源在综合利用上还有很多不足,结合木材工业和环境资源的现状,将秸秆资源实现生物质转化,纤维分离并压制成具有一定物理力学性能的板材具有很大意义。生产纤维板的纤维制造过程中,污水处理一直是一大难题,如何利用好黑液中的木质素是解决此问题的重要方法,黑液中的木质素来源丰富,具有优良的理化特性,是一种重要的基本工业原料,在各领域中有广阔的应用推广前景。综合利用黑液中的木质素,结合木质素胶黏性的研究,让木质素充当胶黏剂的角色,生产制造秸秆人造板可以很好地贯彻这一理念。并且无胶人造板中的天然物质转化法不用添加任何化学助剂,既降低生产成本,又可以避免因化学药剂等带来的污染。

总而言之,高效利用秸秆资源,生产无污染的秸秆人造板,并分析其成板机理有很大的研究意义和前景。由于对秸秆无胶人造板的还停留在基础研究上,目前只有无胶湿法纤维板投入生产,所以如何将秸秆人造板,特别是无胶人造板批量生产,可以从根本上解决秸秆焚烧带来的危害,在经济和社会层面上都有重要意义。

参考文献:

- [1] GHAFFAR S H, FAN M. Differential behaviour of nodes and internodes of wheat straw with various pre-treatments[J]. *Biomass Bioenerg*, 2015, 83: 373-382.
- [2] WANG X, YANG I, STEINHERGER Y, et al. Field crop residue estimate and availability for biofuel production in China[J]. *Renew Sust Energ Rev*, 2013, 27(6): 864-875.
- [3] 韦茂贵, 王晓玉, 谢光辉. 中国各省大田作物田间秸秆资源量及其时间分布[J]. *中国农业大学学报*, 2012, 17(6): 32-44.
- [4] 陈克福. 中国造纸工业绿色进展及其工程技术[M]. 北京: 中国轻工业出版社, 2016: 7-8.
- [5] ZELLER V. Basisinformation für eine nachhaltige Nutzung von landwirtschaftlicher Reststoffe zur Bioenergiebereitstellung[D]. Leipzig: Deutsches Biomasse for Schungszentrum, 2014.
- [6] HAN K H, KO J H, YANG S H. Optimizing lignocellulosic feedstock for improved biofuel productivity and processing[J]. *Biofuel Bioprod Bior*, 2007, 1(2): 135-146.
- [7] SOLOMON B D, BARNES J R, HALVORSEN K E. Grain and cellulosic ethanol: history economics and energy policy[J]. *Biomass Bioenerg*, 2007, 31(6): 416-425.
- [8] TALEBNIA F, KARAKASHEV D, ANGELIDAKI I. Production of bioethanol from wheat straw: an overview on pretreatment, hydrolysis and fermentation[J]. *Biore-source Technol*, 2007, 101(13): 4744-4753.
- [9] 赵蒙蒙, 姜曼, 周祚万. 几种农作物秸秆的成分分析[J]. *材料导报*, 2011, 25(8): 122-125.
- [10] ROWELL R M. Composites from agriculture-based resources in: proceedings of the use of recycled wood and paper in building application[C]// *Proceeding NO.7286*, Forest Product Society, Madison, WI, 1996.217-222.
- [11] ROSSBERG C, STEFFIEN D, BREMER M, et al. Pulp properties resulting from different pretreatments of wheat straw and their influence on enzymatic hydrolysis rate[J]. *Bioresource Technol*, 2014, 169(5): 206-212.
- [12] 张洋, 华毓坤, 封维忠. 电子自旋共振波谱仪研究麦秸中的自由基[J]. *林业科学*, 2001, 37(6): 75-79.
- [13] 连海兰, 周定国, 尤纪雪. 麦秸秆成分剖析及其胶合性能的研究[J]. *林产化学与工业*, 2005, 25(1): 69-72.
- [14] SHEHATA S M. Straw wastes from an environmental disaster to ECO-Board towards a sustainable urban environment[J]. *Procedia Environ Sci*, 2016, 34: 539-546.
- [15] 周定国, 张洋. 我国农作物秸秆材料产业的形成与发展[J]. *木材工业*, 2007, 21(1): 5-8.
- [16] 陈琳, 沈文星, 周定国. 我国秸秆人造板工业的发展现状

- 状与对策[J]. 福建林业科技, 2006, 133(13): 166-168.
- [17] 程圣和. 废弃物二次价值开发设计研究[D]. 南京: 南京艺术学院, 2010: 1-3.
- [18] BOQILLON N, ELBEZ G, SCHONFELD U. Properties of wheat straw particleboards bonded with different types of resin[J]. Wood Science, 2004, 50(3): 230-235.
- [19] HALVARSSON S, EDLUND H, NORGRÉN M. Properties of medium-density fiberboard (MDF) based on wheat straw and melamine modified urea formaldehyde (UMF) resin[J]. Ind Crop Prod, 2008, 28(1): 37-46.
- [20] HALVARSSON S, EDLUND H, NORGRÉN M. Manufacture of non-resin wheat straw fiberboard[J]. Ind Crop Prod, 2009, 29(2/3): 437-445.
- [21] ZHU X D, WANG F H, LIU Y. Properties of wheat-straw boards with frw based on interface treatment[J]. Physics Procedia, 2012, 32(23): 430-443.
- [22] DUMITRU B, MARIUS M S, ION C, et al. Mechanical properties of composite materials reinforced with wheat traw[J]. Material Plastic, 2010, 47(2): 219-224.
- [23] 朱晓丹. 环保地板用秸秆基木质复合材制备及性能研究[D]. 长沙: 中南林业科技大学, 2015.
- [24] 刘德军, 董彬, 李文斌, 等. 无醛无毒防火秸秆人造板的制备与性能试验[J]. 农业工程学报, 2017, 33(1): 301-307.
- [25] 吴义强, 李新功, 左迎风, 等. 农林剩余物无机人造板研究进展[J]. 林业工程学报, 2016, 1(1): 8-15.
- [26] 符彬, 李新功, 潘亚鸽, 等. 无机麦秸碎料板制备及性能[J]. 功能材料, 2015, 46(1): 1112-1116.
- [27] 吴义强, 李新功, 刘壮青, 等. 一种木基结构人造板料及其制备方法: 104552490A[P]. 2015-04-29.
- [28] 凌启飞, 李新功, 乔建政. 阻燃型木质复合材隔热滞火单元的制备工艺[J]. 中南林业科技大学学报, 2013, 33(9): 112-115.
- [29] 刘军军, 何春霞. 水稻秸秆和淀粉基全降解装饰板的制备[J]. 农业工程学报, 2012, 28(6): 283-288.
- [30] 王敏, 何春霞, 常萧楠, 等. 4种生物胶与麦秸秆制备复合材料性能比较[J]. 复合材料学报, 2016, 33(11): 2625-2633.
- [31] 时君友, 汤芸芸. 改性生物质玉米淀粉压制稻秸秆人造板的研究[J]. 南京林业大学学报(自然科学版), 2011, 35(2): 127-130.
- [32] 国家林业局. 刨花板 第3部分: 在干燥状态下使用的家具及室内装修用板要求: GB/T 4897. 3-2003[S]. 北京: 中国标准出版社, 2003.
- [33] CHENG E, SUN X, KARR G S. Adhesive properties of modified soybean flour in wheat straw particleboard[J]. Compos Part A-Appl S, 2002, 33(6): 797-803.
- [34] LEIVA P, CIANNAMEA E, RUSECKAITE R A, et al. Medium-density particleboards from rice husks and soybean protein concentrate[J]. J Appl Polym Sci, 2007, 106(2): 1301-1306.
- [35] 张亚慧, 祝荣先, 于文吉. 改性大豆蛋白胶黏剂的酸化效应[J]. 中国人造板, 2014, 21(3): 17-19.
- [36] MOBARAK F, FAHMY Y, AUGUSTIN H. Binderless lignocellulose composite from bagasse and mechanism of self-bonding[J]. Holzforschung, 1982, 36(3): 131-136.
- [37] 任博文. 三种非木质材料制备无胶碎料板的加工工艺[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2010.
- [38] Luo P, Yang C M. Production of binderless particleboard using rice straw pretreated with liquid hot water[C]//Applied Mechanics and Materials. Switzerland: Trans Tech Publications, 2012, 200: 331-334.
- [39] 张亚卓. 漆酶预处理制备麦秸无胶纤维板工艺研究[D]. 北京: 北京林业大学, 2012.
- [40] FAHMY T Y A, MOBARAK F. Advanced binderless board-like green nanocomposites from debarked cotton stalks and mechanism of self-bonding[J]. Cellulose, 2013, 20(3): 1453-1457.
- [41] SUZUKI S, SNINTANI H, PARK S Y, et al. Preparation of binderless boards from steam exploded pulps of oil palm (*Elaeis guineensis* Jaxq) fronds and structural characteristics of lignin and wall polysaccharides in steam exploded pulps to be discussed for self-bindings[J]. Holzforschung, 1988, 52(4): 417-426.
- [42] OKUDA N, HORI K, SATO M. Chemical changes of kenaf core binderless boards during hot pressing (II): effects on the binderless board properties[J]. J Wood Sci, 2006, 52(3): 249-254.
- [43] 曹忠荣, 郭文莉, 闫昊鹏. 干法无胶纤维板粘合机理的研究 I. 制板过程中化学成分的变化及作用[J]. 木材工业, 1996, 10(4): 3-11.
- [44] BOUJILA J, LIMARE A, JOLY C, et al. Lignin plasticization to improve binderless fiberboard mechanical properties[J]. Polym Eng Sci, 2005, 45(6): 809-816.