

玉米秸秆基材料研究进展

王晓娥, 林彦萍, 杨晓东*

(吉林工程技术师范学院, 长春 130052)

摘要:玉米秸秆是一种富含纤维素、半纤维素、木质素的生物质材料,具有优异的综合力学性能。近年来对玉米秸秆综合利用的研究取得很大进展,尤其作为生物质功能材料,在建筑业、工业、农业、环保、食品等领域的应用推动了玉米秸秆材料化研究的快速发展。本文在综述玉米秸秆材料特性的基础上,重点对其在建筑材料、吸附材料、包装造纸材料和电池材料等四个方面的最新研究与开发进展进行梳理,并对玉米秸秆材料化应用存在的问题及发展方向提出展望。

关键词:玉米秸秆;建筑材料;复合材料;炭材料;3D打印

中图分类号:S38

文献标识码:A

文章编号:2096-5877(2019)06-0080-06

Research Progress on Corn Stalk-based Materials

WANG Xiao'e, LIN Yanping, YANG Xiaodong*

(Jilin Engineering Normal University, Changchun 130052, China)

Abstract: Corn stalk is a kind of biomass material rich in cellulose, hemicellulose and lignin, which has excellent comprehensive mechanical properties. In recent years, great progress has been made in the research on the comprehensive utilization of corn stalk, especially as biomass functional materials. Its application in construction, industry, agriculture, environmental protection, food and other fields has promoted the rapid development of corn stalk material research. On the basis of summarizing the characteristics of corn stalk materials, this paper focuses on its latest research and development progress in building materials, adsorption materials, packaging and papermaking materials and battery materials, and puts forward the prospects for the problems and development direction of the application of corn stalk materials.

Key words: Corn stalk; Building material; Composite material; Carbon material; 3D printing

近年来,随着森林、石油、煤炭等传统资源的不断匮乏与日益枯竭,开发一种来源丰富、环境友好的可再生资源迫在眉睫。作为一种天然生物质,玉米秸秆价格低廉、储量巨大且对环境友好,可替代木材、炭等原料制备附加值更高的新型功能材料。据统计全球玉米秸秆年产量约13亿吨,我国约2.6亿吨,约占全球20%,东北区是我国最大的玉米产区,玉米秸秆产量占全国约31%^[1]。目前玉米秸秆资源利用主要集中在肥料、饲料、燃料等方面^[2-3],产品附加值较低,利用率不到总量30%,多数被丢弃或焚烧,造成环境严重污染与资源极大浪费^[4]。本文重点针对玉米秸秆材料在建

筑、环保、包装造纸、电池等领域的最新应用研究进行梳理,为进一步开辟玉米秸秆基功能材料的高值化利用途径提供借鉴。

1 玉米秸秆的材料特性

玉米秸秆基功能材料研究的快速发展,主要依赖于对其自身化学成分、结构及性能等材料特性的深入研究,为制备不同功能材料提供了最重要的科学依据。

1.1 玉米秸秆成分与结构研究

玉米秸秆中纤维素(Cellulose)、半纤维素(Hemicellulose)和木质素(Lignin)平均含量分别为35%、22%和18%,成分与含量均与木材相当,因此在某些领域可作为木材的替代物^[5]。玉米秸秆主要由茎、叶两部分组成,其中茎为主要利用部位,由外皮(Stem rind)、芯穰(Stem pith)和茎结(Stem node)组成,叶部主要由叶鞘(Leaf sheath)和叶片(Leaf)组成^[6]。外皮富含蜡质和灰

收稿日期:2019-02-13

基金项目:国家自然科学基金项目(51875249);吉林省教育厅“十三五”科学技术项目(JJKH20180500KJ)

作者简介:王晓娥(1979-),女,副教授,博士,主要从事生物质材料胶黏剂研究。

通讯作者:杨晓东,男,博士,教授, E-mail: y86908051@126.com

分(主要成分为 SiO_2),纤维素、木质素含量高,细胞致密且结构强度大,承担了秸秆的主要机械性能,但 SiO_2 成分会严重影响材料的胶合性能;芯秆中半纤维素含量较高,结构松软呈网孔状,具有较好的吸附性能和缓冲性能^[7-8]。玉米秸秆含有大量碳元素,利用物理或化学方法将其制成比表面积大、富含活性官能团的功能性炭材料,可广泛用于重金属等污染物的吸附和电池能源等领域^[9]。玉米秸秆不同部位的成分、结构、性能差异显著,导致制备材料过程中存在一定困难,这也是阻碍玉米秸秆材料化利用的重要因素之一^[10]。种植产区、栽培条件、玉米品种等因素会导致秸秆中的成分含量出现一定差异,因此制备材料时应将该因素考虑在内,避免在工业化生产中造成产品质量不稳定。

1.2 玉米秸秆性能研究

玉米秸秆纤维形态与木材相似,纤维长度约 $1\ 870\mu\text{m}$,直径约 $16.1\mu\text{m}$,纤维壁厚度约 $4.59\mu\text{m}$ ^[11]。玉米秸秆不同部位结构成分差异较大,导致其力学性能不均匀。对外皮和内秆分别进行拉伸测试,拉伸后的秸秆外皮具有塑料材料特性,而内秆则具有脆性材料特性。秸秆外皮的弹塑性(Elastic-plastic)较强,张应力(拉伸负荷)强度为 $80.53\sim 178.15\text{ MPa}$ (平均 122.26 MPa),弹性系数约为 $11.38\sim 35.01\text{ MPa}$ (平均 19.32 MPa),秸秆根部的弹塑性最强,优良的弹塑性能使秸秆皮在纺织品、木塑材料等深加工领域应用广泛^[12]。玉米秸秆优异的机械性能使其在人造板等建筑材料中的应用研究备受关注,以玉米秸秆为原料制备的人造板材,经测试样品的静曲强度(MOR)平均值为 $(47.86\pm 0.88)\text{ MPa}$,弹性模量(MOE)平均值 $(4\ 485.76\pm 68.8)\text{ MPa}$,分别显著高于标准中的 14 MPa 和 $1\ 800\text{ MPa}$,达到我国人造板国家和行业标准GB/T 4897.3(2003)和GB/T17657(2013),且商品性能优于木材生产的碎料板^[13]。Chen和Rodriguez等^[14-15]发现,将玉米秸秆替代木材与聚乙烯、聚丙烯、玻璃纤维等混合制备木塑材料,可使抗张强度(Tensile strength)和挠曲强度(Flexural strength)达到 24 MPa 、 66 MPa ,相比对照分别提高31%和23%,为后续利用玉米秸秆制备木塑等复合材料提供理论基础。

2 玉米秸秆基材料的应用现状

2.1 玉米秸秆建筑材料

将玉米秸秆作为主料、辅助材料或强化材料,

按照一定配比,通过物理、化学或两者结合的方式,制备具有一定结构和功能的建筑材料,是目前玉米秸秆材料化应用的最主要方式。使用玉米秸秆替代木材生产建筑材料,不仅解决了农作物秸秆资源浪费及环境污染问题,还能缓解森林资源匮乏、木材供应紧张的局面。

2.1.1 玉米秸秆人造板

国外使用玉米秸秆制备人造板的历史可追溯到20世纪初期的美国^[16],但由于加工工艺复杂,且需要大量的人力和物力,在当时并没有形成大规模工业化生产^[17]。随后比利时、英国、德国、日本、北美等国家和地区开始将研究转向更容易收取和运输的甘蔗渣、麦秸、稻草等农作物秸秆为主要原料制备人造板,我国以稻草秸秆为主。直到20世纪70年代,随着玉米大量种植,以及森林木材资源不断锐减,中国开始玉米秸秆人造板的研究工作^[13]。

南京林业大学、东北林业大学、中国林业科学院等高校和科研院所对秸秆制备人造板的研究比较深入,多集中在原料预处理^[18]、制板工艺^[19]和胶黏剂研发^[20]等方面。Lu等利用玉米秸秆皮和木屑混合制备复合板材,从原料配比、施胶量等方面对复合板的外观、物理性能和机械性能进行优化,通过正交试验获得最佳工艺参数为:玉米秸秆与木屑比例3:7,施胶量12%,热压温度 150°C ,热压时间 4.5 min ,复合板材达到国家标准且机械性能良好^[21]。何勋对玉米秸秆皮的力学特性、表面湿性、胶合性能等材料特性及制板工艺开展研究,提出了利用完整玉米秸秆皮制备层积材和复合板材的两种方法,获得两种不同类型板材的制备工艺及板材性能参数,制备的复合板材物理力学性能满足GB/T4897.3-2003《室内装修刨花板》使用要求^[22]。

胶黏剂一直是影响玉米秸秆人造板性能的重要因素,传统胶黏剂为脲醛树脂、酚醛树脂、异氰酸酯等合成胶黏剂,由于石油原料紧缺、甲醛释放及成本等问题,正逐渐被生物胶黏剂、无胶生产工艺所取代^[23]。使用蛋白质、淀粉、木质素或其改性产物制备生物胶黏剂,生产可降解、无甲醛的环保人造板,测定其力学性能、抗弯性能等均可达到人造板国家相关标准^[24]。目前无胶人造板因其无环境污染、成本低及生产过程简化等优势具有极大的发展潜力。Le等^[25]采用热压方式制备玉米秸秆颗粒板,借助傅里叶红外光谱仪、X射线衍射仪等仪器测定颗粒板的成分与结构变化,发

现在热压条件下,秸秆中的半纤维结构发生变化,木质素与木糖之间作用是产生自胶合的主要原因,也是决定颗粒板性能的主要因素。

我国玉米秸秆人造板的理论研究比较深入,但工厂化生产进展仍然缓慢。究其原因,主要有以下三方面因素:第一,玉米秸秆相比其它作物秸秆体积较大,不同部位的成分、结构、性能差异比较显著,因此在储存、运输、预处理等方面需要更大成本和技术支撑;第二,玉米秸秆皮表面含有的 SiO_2 和灰分等物质严重影响人造板的胶合性能,胶黏剂的界面相容性、价格高及污染等问题是限制人造板发展的重要因素;第三,玉米秸秆人造板工厂化的生产工艺和设备条件尚不成熟。解决以上问题是促进玉米秸秆人造板工厂化生产以及秸秆材料化利用的根本途径。

2.1.2 玉米秸秆木塑材料

大多数情况下,单质材料难以满足对材料性能的需求,材料复合化成为必然发展趋势。将木纤维和塑料按照一定比例混合,制成的复合材料称为木塑材料(Wood-Plastic Composites, WPC)^[14]。该材料轻质防水、耐酸碱并具有良好的力学和热学性能,可代替部分木材或塑料应用于建材、家具、装饰等建筑领域^[26-27]。木塑材料最早起源于20世纪初期的欧洲,美国早在几十年前就开始了相关研究,1991年在美国召开第一届国际木塑复合材料会议,迎来了木塑材料快速发展的新时期。随后木塑材料进入中国,并因其良好的力学性能和环保特性得到广泛关注。

目前玉米秸秆等农作物废弃物正逐渐替代木材作为主要原料^[28],与聚乙烯(PE)、聚丙烯(PP)、高密度聚乙烯(HDPE)等热塑性塑料混合制备木塑材料,研究主要集中在秸秆与塑料之间比例及工艺条件优化等方面。刘飞虹等^[29]使用玉米秸秆粉体与聚乙烯(PE)制备木塑材料,研究秸秆不同添加量对木塑材料拉伸、冲击强度等机械性能的影响,结果表明玉米秸秆添加量达到50%时,木塑材料综合力学性能最佳。玉米秸秆不同部位纤维素含量差异较大,使用玉米秸秆不同部位制作木塑材料,发现纤维素含量最多的茎部可显著提高木塑材料的弯曲和拉伸强度,而纤维素含量最少的叶片制备木塑材料的力学性能最低^[30]。木塑材料中含有天然生物质材料,在自然条件下可发生微生物降解作用,利用氨溶铜季铵盐(ACQ)和硼酸锌(ZB)对玉米秸秆木塑材料进行防腐处理,可显著提高其抵抗白蚁、霉菌、木腐菌等多种生

物的降解作用,可为材料有效利用及回收提供有效途径^[31]。

木塑材料具有木质纤维与塑料的双重特点,不仅可燃,且燃烧的热释放速率快、热量高,一定程度上限制了其应用范围。目前,木塑材料主要用于户外栈道铺板、公共型材、车辆船舶等领域。随着阻燃技术不断发展,木塑材料可在建筑门窗、家居饰材、集成房屋和多功能板材等领域开始规模化拓展^[32]。

2.1.3 玉米秸秆墙体材料

将玉米秸秆添加到石膏^[33]、水泥^[34]、土壤^[35]、混凝土^[36]等制备秸秆砖或建筑墙体材料,可显著提高房屋的光辐射性能、保温性能、隔音性能、防水性能等,具有可持续发展、无污染、低能耗的优点^[37]。

王建恒等^[38]研究玉米秸秆不同掺量制备氯氧镁水泥基复合保温材料,确定了玉米秸秆最适掺量为20%,保温材料的力学性能、耐水性能、密度及导热系数最佳。此外,生物质砖是一种能够替代实心粘土砖的新型轻质、绿色环保建筑材料, Ma等^[39]使用玉米秸秆制备生物质砖,利用扫描电镜和X-射线衍射仪对生物质砖的结构进行观察,研究发现在氢氧化钙胶黏剂的强碱作用下,玉米秸秆发生降解作用,导致纤维素和半纤维素、半纤维素和木质素以及木质素之间的氢键、醚键破坏,生成新的有机或无机复合物,从而提高生物质砖的力学性能。秸秆中的半纤维素在碱性条件下可生成葡萄糖、甘露糖及一些酯类等物质,使水泥、石膏等产生缓凝作用从而延长凝结时间,并降低材料的使用强度,这是玉米秸秆墙体在实际生产中亟待解决的技术问题。目前可通过热碱浸泡对秸秆进行预处理,将半纤维素等成分预先分解,可缓解糖类对水泥水化作用的影响,但同时也面临着环境污染与工艺复杂等问题。

2.2 玉米秸秆吸附材料

近年来,以玉米秸秆制备吸附材料成为研究新热点。玉米秸秆吸附材料具有环境友好、原料来源丰富、可降解、可回收等显著优点,在处理重金属、石油、污水、土壤等污染物方面拥有广阔的发展前景^[40]。玉米秸秆在缺氧或厌氧条件下进行热裂解,生成含有天然分子空隙与孔洞的炭材料,被称为超级吸附剂^[41]。利用玉米秸秆中的纤维素制备成膜或其他复合材料也具有较好的吸附性能,并可显著提高吸附材料的回收利用率。

生物炭材料具有高比表面积、多孔隙的结构

特点,有较强的离子交换性。吸附机理为通过分配作用、表面吸附、孔隙截留等作用对污染物进行吸附并使其保持稳定。热解温度是制备生物炭材料的重要因素之一,随着温度升高,炭材料的比表面积和孔隙度均会增加,但当温度达到800℃或以上时,生物炭的骨架结构呈现不稳定状态,从而导致吸附性能降低。分别在300℃和700℃条件下制备玉米秸秆生物炭,结果表明700℃条件下制备的炭材料比表面积为375.89 m²/g,孔容积为0.2302 m³/g,对十二烷基苯磺酸(DBSA)有较强的吸附作用,吸附性能显著高于300℃条件下制备的炭材料^[42]。该生物炭材料还可在高盐条件下对污水中的六价铬离子选择性吸附,并通过电子转移将其变成无毒的三价铬离子,可为高盐条件下治理重金属污染提供借鉴^[43]。将玉米秸秆生物炭与羟基氧化铁纳米棒(α -FeOOH nanorods)合成复合材料,该材料含有丰富的氧官能团、高比表面积和优良的孔隙结构,用该复合材料吸附铜离子,吸附率达到71.9%,显著高于对照组的42.3%和6.7%^[44]。

利用玉米秸秆纤维素制备纤维素复合膜,可为生物质吸附材料的制备及应用提供新思路。Wu等^[45]采用碱处理方法提取玉米秸秆中纤维素并制成膜,利用环氧氯丙烷和二亚乙基三胺对其进行改性,改性后纤维素膜具有更高水通量、更低接触角和保水性,对亚甲基蓝吸附剂量达到8.75 mg/g,约是对照吸附量(1.35 mg/g)的6倍。提取玉米秸秆中纤维成分并使之与石墨烯进行复合,复合材料对有机磷农药具有较强吸附作用,最大吸附量达到152.5 mg/g,显著高于多壁碳纳米管、活性炭等传统吸附材料,且经过8次回收重复利用,复合材料仍具有超过80%的吸附能力^[46]。

2.3 玉米秸秆造纸、包装材料

2015年5月,多位院士和专家建议“推广先进技术模式利用农业秸秆制浆造纸”认为:采用清洁制浆方式制备纸张、一次性餐具等是秸秆材料化利用的重要途径之一^[47]。此外,玉米秸秆还可以生产全降解型包装及缓冲材料,部分替代塑料、聚苯乙烯等难降解包装材料,减少白色污染。

传统制浆多采用化学方法,主要包括烧碱法、硫酸盐法及亚硫酸盐法等。随着对环境污染日益重视,制浆过程中的化学试剂及污染物已成为造纸业亟待解决的问题^[48]。凡能使污染物减少的技术或方法都称为清洁制浆,是一种低耗能、低污染的制浆方式。目前清洁制浆方法主要包括膨化

制浆技术、氧化技术、DMC催化技术、生物技术等,其中生物制浆因其在环境、能源方面的独特优势,代表着清洁制浆技术发展的方向^[49]。利用毛栓菌(*Trametes hirsuta*)处理玉米秸秆制浆造纸,可降低磨浆能耗,减少污染物排放,但也存在纸硬度和白度不足问题,需进一步改进工艺^[50]。利用玉米秸秆制浆生产全降解一次性餐具,目前在我国已广泛应用。

传统的包装、缓冲材料多为塑料及发泡聚苯乙烯(EPS)等,其化学性质稳定且极难降解,给环境带来严重污染。近年来,利用秸秆纤维生产发泡制品成为包装材料的研究新领域,该新型缓冲材料具有原料来源广泛、低成本、无污染等优点,且性能与EPS制品相当。高杨^[51]以废纸纤维和玉米秸秆为原料,制备新型轻质发泡材料,得到秸秆含量为45%时发泡包装材料性能最优。此外还可将秸秆纤维成分提取制作纳米复合材料,将其添加到薄膜或淀粉基中制备可降解的工业及食品包装材料,可显著延长食物贮藏保鲜时间,明显提高秸秆商品的附加值^[52-53]。

2.4 玉米秸秆电池材料

生物炭材料最初主要应用于土壤改良、环境污染治理等方面,随着能源短缺以及对环境友好型电池需求的加剧,开发以生物质炭为原料的离子电池材料受到广泛关注。将玉米秸秆经高温或化学处理后,合成的生物质炭材料具有丰富孔隙,有利于离子交换与扩散,可作为离子电池的负极材料,有望在医用电子设备、交通、电网等领域广泛应用。不仅满足电极材料高安全性和低成本的要求,还可以解决传统电极材料制作过程中产生的环境污染^[54]。

玉米秸秆生物炭材料的制备仍处于初级阶段,研究多集中在工艺条件的优化等方面^[54]。Qin等^[55]以玉米秸秆为原料,在1200℃高温条件下合成类石墨烯结构的生物炭材料,X-射线衍射结果显示样品(0.384 nm)比普通石墨烯(0.335 nm)具有更大的层间距,可储备更多的钠离子,从而拥有良好的再循环利用性能。玉米秸秆皮和芯糠的成分和结构差异较大,分别以二者为原料在液氮条件下冷冻干燥,然后进行炭化制备电极材料,由秸秆皮制得的炭材料比表面积约为332.07 m²/g,而由芯糠制得的炭材料呈现出类石墨烯的二维多孔纳米结构,比表面积可高达805.17 m²/g,结果显示由芯糠制得的炭材料表现出更高的电容性^[56]。Zhu等^[57]也证实利用玉米秸秆芯糠制备的硬炭材料具

有优良电化学性能,其可逆容量达到 310 mAh/g,经过 700 个循环后留存率仍达 79%。

3 问题与展望

玉米秸秆作为功能材料的研究已经取得了许多成果,但也面临着诸多问题。如以玉米秸秆为原料的人造板生产工艺和加工装备尚不成熟,目前的加工工艺与装备主要参考木材为原料的人造板生产,并不完全适合玉米秸秆等生物质材料的加工,因此导致不能大规模工业化生产;胶黏剂是制备秸秆材料不可缺少的原料,但普遍存在甲醛污染及高成本等问题,成为阻碍其发展的主要因素之一;秸秆用于制备电池材料等方面的研究尚处于初级阶段,如何降低耗能成本成为其技术关键。

在后续玉米秸秆材料化开发过程中,可从以下方面继续深入开展研究:(1)在原料预处理、热压温度、热压时间等环节继续优化玉米秸秆人造板生产工艺,研发玉米秸秆人造板专用加工装备。(2)利用生物胶黏剂或无胶工艺代替化学胶黏剂,解决生物质胶黏剂胶合强度低、耐水性能差等问题,进一步完善无胶生产工艺。(3)降低炭材料制备过程中的能耗,提高材料电容性能。(4)开发玉米秸秆材料化应用新领域,借助物理、化学和生物等加工手段将玉米秸秆与塑料按一定比例混合制备 3D 打印生物质基复合材料,也是玉米等农作物秸秆新型材料应用研究的发展方向之一。

参考文献:

- [1] 梁 卫,袁静超,张洪喜,等.东北地区玉米秸秆还田培肥机理及相关技术研究进展[J].东北农业科学,2016,41(2): 44-49.
- [2] 张丽霞,王俊文,王立春,等.有机物料腐熟剂在东北农作物秸秆还田上的应用[J].东北农业科学,2018,43(6):5-8.
- [3] Kou L F, Song Y L, Zhang X, et al. Comparison of four types of energy grasses as lignocellulosic feedstock for the production of bio-ethanol[J]. Bioresource Technology, 2017, 241: 424-429.
- [4] Wang X F, Gu R R, Wang L W, et al. Emissions of fine particulate nitrated phenols from the burning of five common types of biomass[J]. Environmental Pollution, 2017, 230: 405-412.
- [5] Mei Y, Che Q, Yan Q, et al. Torrefaction of different parts from a corn stalk and its effect on the characterization of products[J]. Industrial Crops & Products, 2016, 92: 26-33.
- [6] Liu Z H, Chen H Z. Mechanical property of different corn stover morphological fractions and its correlations with high solids enzymatic hydrolysis by periodic peristalsis[J]. Bioresource Technology, 2016, 214: 292-302.
- [7] Zhang L X, Yang Z P, Zhang Q, et al. Mechanical behavior of corn stalk pith: an experimental and modeling study[J]. IN-MATEH-Agricultural engineering, 2017, 51(1):39-48.
- [8] Cao Y H, Wang K L, Wang X M, et al. Preparation of active carbons from corn stalk for butanol vapor adsorption[J]. J. Energy Chem, 2017, 26 (1): 35-41.
- [9] Hussein M, Amer A A, Azza E, et al. A comprehensive characterization of corn stalk and study of carbonized corn stalk in dye and gas oil sorption[J]. Journal of Analytical and Applied Pyrolysis, 2009,86(2):360-363.
- [10] Reddy N, Yang Y. Natural Cellulose Fibers from Corn Stover [M]. Berlin: Springer, 2015: 20-25.
- [11] Ganjyal G, Reddy N, Yang Y, et al. Biodegradable Packaging Foams of Starch Acetate Blended with Corn Stalk Fibers [J]. Journal of Applied Polymer Science, 2004, 93 (6): 2627-2633.
- [12] Zhang L X, Yang Z P, Zhang Q, et al. Tensile Properties of Maize Stalk Rind[J]. Bioresources, 2016,11(3): 6151-6161.
- [13] He X, Wang D F, Zhang Y L, et al. Manufacturing Technology and Parameter Optimization for Composite Board from Corn Stalk Rinds[J]. Bioresources, 2016, 11(2): 4564-4578.
- [14] Chen J, Teng Z Y, Wu J J. Recycling of Waste FRP and Corn Straw in Wood Plastic Composite[J]. Polymer Composite, 2017, 38(10): 2140-2145.
- [15] Rodriguez M, Rodrigues A, Bayer R, et al. Determination of Corn Stalk Fibers' Strength through Modeling of the Mechanical Properties of Its Composites[J]. Bioresources, 2010, 5(4): 2535-2546.
- [16] Sweeney O R, Emley W E. Manufacture of Insulating board from cornstalks[M]. Washington: United States Government Printing Office, 1930: 1-3.
- [17] Arnold L. Making insulating board from cornstalks[J]. Cellulose, 1930, 5(1):272-275.
- [18] Xu J, Zhou G Q, Li J, et al. Effect of steam explosion pretreatment on the chemical composition and fiber characteristics of cornstalks[J]. Journal of Bioresources and Bioproducts, 2017, 2 (4): 153-157.
- [19] Wu T T, Wang X L, Kitoa K. Effects of pressures on the mechanical properties of corn straw bio-board[J]. Engineering in Agriculture, Environment and Food, 2015, 8(3): 123-129.
- [20] 周定国,汤正捷,张 芮.我国秸秆人造板产业的腾飞与超越-胶黏剂与其他添加剂[J].林产工业,2016,43(9):3-5.
- [21] Lu H X, Zhang X Q, Yu B. Optimization of corn-stalk skin flake-wood shaving composite technology[J]. J. For. Res., 2015, 26(3):759-763.
- [22] 何 勋.玉米秸秆皮材料特性及其制板工艺研究[D].郑州:河南农业大学,2016.
- [23] Fu Z, Wei W, Jin T, et al. Moisture absorption properties of biomimetic laminated boards made from cross-linking starch/maize stalk fiber[J]. International Journal of Agricultural & Biological Engineering, 2015, 8(2): 65-71.
- [24] Theng D, Mansouri N E, Arbat G, et al. Fiberboards made from corn stalk thermomechanical pulp and kraft lignin as a green adhesive[J]. Bioresources, 2017, 12(2): 2379-2393.
- [25] Le X, An J J, Zhang G Y, et al. Investigation of the structural

- characteristics of corn stalk during hot-pressing[J]. *Bioresources*, 2016, 11(4):10213-10225.
- [26] Ashori A, Nourbakhsh A. Bio-based composites from waste agricultural residues[J]. *Waste Management*, 2010, 30(4): 680-684.
- [27] Jirleska F, Israel G, Jordi B, et al. Management of corn stalk waste as reinforcement for polypropylene injection moulded composites[J]. *Bioresources*, 2012, 7(2):1836-1849.
- [28] Nourbakhsh A, Ashori A. Wood plastic composites from agro-waste materials: Analysis of mechanical properties[J]. *Biore-source Technology*, 2010, 101: 2525-2528.
- [29] 刘飞虹, 韩广萍, 程万里. 玉米秸秆粉体/聚乙烯复合材料的制备及性能[J]. *东北林业大学学报*, 2015, 43(4): 119-122.
- [30] Luo Z F, Li P, Cai D, et al. Comparison of performances of corn fiber plastic composites made from different parts of corn stalk [J]. *Industrial Crops and Products*, 2017, 95: 521-527.
- [31] Xuan L H, Hui D X, Cheng W L, et al. Effect of preservative pretreatment on the biological durability of corn straw fiber/HDPE composites[J]. *Materials*, 2017, 10(7):789-806.
- [32] 彭飞. 中国秸秆产业蓝皮书[M]. 北京: 中国农业出版社, 2017: 84-87.
- [33] 李国忠, 刘民荣, 高子栋, 等. 聚乙烯醇包覆玉米秸秆纤维对石膏性能的影响[J]. *建筑材料学报*, 2011, 14(2): 278-281.
- [34] Jarabo R, Monte M C, Fuente E, et al. Corn stalk from agricultural residue used as reinforcement fiber in fiber-cement production[J]. *Industrial Crops and Products*, 2013, 43: 832-839.
- [35] Lu Z G, Zhao Z Y, Wang M, et al. Effects of corn stalk fiber content on properties of biomass brick[J]. *Construction and Building Materials*, 2016, 127: 11-17.
- [36] Aksogan O, Binici H, Ortlek E. Durability of concrete made by partial replacement of fine aggregate by colemanite and barite and cement by ashes of corn stalk, wheat straw and sunflower stalk ashes[J]. *Construction and Building Materials*, 2016, 106(1): 253-263.
- [37] 中国循环经济协会墙材革新工作委员会. 墙体材料革新工作现状与“十三五”展望[J]. *砖瓦世界*, 2015(2): 17-19.
- [38] 王建恒, 田英良, 徐长伟, 等. 玉米秸秆掺量对氯氧镁水泥复合保温材料性能的影响[J]. *新型建筑材料*, 2016(5): 87-90.
- [39] Ma C, Zhang S, Dong R D, et al. Corn stalk fiber-based biomass brick reinforced by compact organic/inorganic calcification composites[J]. *Sustainable Chemistry & Engineering*, 2018, 6(2): 2086-2093.
- [40] Lei Y Q, Su H Q, Tian R K. Morphology evolution, formation mechanism and adsorption properties of hydrochars prepared by hydrothermal carbonization of corn stalk[J]. *RSC Advances*, 2016, 6: 107829-107835.
- [41] Ahmad M, Rajapaksha Au, Lim Je, et al. Biochar as a sorbent for contaminant management in soil and water: A review[J]. *Chemosphere*, 2014, 99: 19-33.
- [42] Zhao N, Yang X X, Zhang J, et al. Adsorption mechanisms of dodecylbenzene sulfonic acid by corn straw and poplar leaf biochars[J]. *Materials*, 2017, 10(10): 1119.
- [43] Zhao N, Yin Z, Liu F, et al. Environmentally persistent free radicals mediated removal of Cr(VI) from highly saline water by corn straw biochars[J]. *Biore-source Technology*, 2018, 260: 294-301.
- [44] Yang F, Zhang S S, Li H P, et al. Corn straw-derived biochar impregnated with α -FeOOH nanorods for highly effective copper removal[J]. *Chemical Engineering Journal*, 2018, 348: 191-201.
- [45] Wu L S, Sun J F, Wu M T. Modified cellulose membrane prepared from corn stalk for adsorption of methyl blue[J]. *Cellulose*, 2017, 4724(12): 5625-5638.
- [46] Suo F Y, Xie G X, Zhang J, et al. A carbonised sieve-like corn straw cellulose-graphene oxide composite for organophosphorus pesticide removal[J]. *RSC Advances*, 2018, 8: 7735-7743.
- [47] 陈克复, 田晓俊, 王斌, 等. 利用农业秸秆制浆造纸所实施的先进技术体系的优选与评价[J]. *华南理工大学学报(自然科学版)*, 2015(10): 122-130.
- [48] Chesca A M, Nicu R, Tofanica B M, et al. Pulping of corn stalks-assessment for bio-based packaging materials[J]. *Cellulose Chemistry and Technology*, 2018, 52(7-8): 645-653.
- [49] 陈嘉川, 李凤宁, 杨桂花. 非木材生物制浆技术新进展[J]. *中华纸业*, 2017, 38(4): 7-12.
- [50] Wang F F, Chen H L, Ai M Q, et al. Biomechanical pulping of corn stalk rind with a white rot fungus *trametes hirsuta* and the use of delignified corn stalk pith as a pulp additive[J]. *Biore-sources*, 2015, 10(4): 8565-8579.
- [51] 高杨. 玉米秸秆增强植物纤维基发泡材料的研究[D]. 呼和浩特: 内蒙古农业大学, 2016.
- [52] Balea A, Merayo N, Seara M, et al. Effect of NFC from organo-solv corn stalk pulp on retention and drainage during papermaking[J]. *Cellulose Chem. Technol*, 2016, 50(3-4): 377-383.
- [53] Sun H T, Shao X R, Ma Z S. Effect of incorporation nanocrystalline corn straw cellulose and polyethylene glycol on properties of biodegradable films[J]. *Journal of Food Science*, 2016, 81(10): 2529-2537.
- [54] 秦德才. 钠离子电池生物质碳阳极制备、改性及电化学性能研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2017.
- [55] Qin D C, Zhang F, Dong S Y, et al. Analogous graphite carbon sheets derived from corn stalks as high performance sodium-ion battery anodes[J]. *RSC Advances*, 2016, 6: 106218-106224.
- [56] Gao K Z, Niu Q Y, Tang Q H, et al. Graphene-Like 2D porous carbon nanosheets derived from cornstalk pith for energy storage materials[J]. *Journal of Electronic Materials*, 2018, 47(1): 337-346.
- [57] Zhu Y E, Gu H C, Chen Y N, et al. Hard carbon derived from corn straw piths as anode materials for sodium ion batteries[J]. *Ionics*, 2018, 24: 1075-1081.