

混配成型条件下农林废弃物资源化利用现状及发展分析

郭文斌 齐文静 王志鹏 王春光

(内蒙古农业大学 机电工程学院,呼和浩特 010018)

摘要 为深入了解混配成型方法在农林废弃物压缩成型研究领域的应用情况,分析其发展趋势,采用文献研究的方法对混配成型条件下农林废弃物资源化利用研究现状进行分类总结。结果表明:1)农林废弃物在燃料化、饲料化、材料化利用过程中,可通过混配成型改善产品的燃烧品质、饲喂效果、材料性能、加工成本等指标。2)混配成型的关键在于将不同农林废弃物的理化特点结合起来形成互补,通过充分发掘物料自身潜力,达到改善成型能力、降低加工成本、提升使用性能的目的。据此提出农林废弃物混配成型研究在资源化利用方面的发展对策,建议将农林废弃物混配成型机理的多尺度分析,作为未来该领域研究的重点与方向。

关键词 农林废弃物; 资源化利用; 混合物料; 成型; 研究现状

中图分类号 X71;X72

文章编号 1007-4333(2021)01-0143-08

文献标志码 A

Analysis on the research status and development of agricultural and forestry waste resource utilization under the condition of blending and briquetting

GUO Wenbin, QI Wenjing, WANG Zhipeng, WANG Chunguang

(College of Mechanical and Electrical Engineering, Inner Mongolia Agricultural University, Hohhot 010018, China)

Abstract In order to deeply understand the application of blended feedstock briquetting method in the studies of agricultural and forestry wastes briquetting, and analyze its development trend in the future, the research status of agricultural and forestry waste resource utilization under the condition of blending and briquetting are categorized and summarized by literature research. The results show that: 1) When agricultural and forestry wastes are reused in producing fuel, forage, biocomposite, the blended feedstock briquetting method can help to improve the combustion quality, feeding effects, material performance and processing cost of biomass products. 2) The key to blended feedstock briquetting is to combine the physical and chemical characteristics of various agricultural and forestry wastes so as to optimize the briquetting capacity and to improve the usability of biomass products at reduced cost. Finally, development countermeasures are put forward accordingly, and using multi-scale analysis to study the briquetting mechanism of blended feedstock is suggested as a research emphasis in the future.

Keywords agricultural and forestry wastes; resource utilization; blended feedstock; briquetting; research status

农林废弃物是重要的生物质资源,主要来源于农业与林业生产加工后的植物残留,如秸秆、牧草、稻壳、木屑、落叶、树枝、薯渣、甘蔗渣、果壳等,具有可再生,可持续,利用方式多样,资源丰富等特点。近年来我国年产农林废弃物接近 20 亿 t,种类繁多,

产量巨大^[1-2],除少部分得到再利用外,大多被焚烧或掩埋,造成了资源浪费,直接或间接导致了环境污染。农林废弃物大多具有群体松散,容积密度小,保持形状及尺寸能力差,可压缩性好的特点,其在生产过程中既呈现固态又表现出了流体性质,因此

收稿日期:2020-05-09

基金项目:国家自然科学基金项目(31960365,51766016);国家重点研发计划项目(2016YFD0701704);内蒙古自治区高等学校科学技术研究项目(NJZY20045)

第一作者:郭文斌,副教授,主要从事农业物料力学特性研究,E-mail:weningwb2000@sina.com

国内外从20世纪30年代起就对其开始了压缩成型技术与应用研究,其应用主要集中在生产饲料与燃料上,推动了相关技术的发展^[3-6]。例如我国于20世纪90年代起步的秸秆类草物料流变学特性试验及成型理论研究^[7-9],其研究方法、思路不断扩展至其他物料,促进了我国农林废弃物资源化利用技术的发展。

近年来,我国在农林废弃物生物质成型领域的研究进展有所放缓,许多研究仍集中在单一类别农林废弃物的成型及力学特性分析上,大多数单一物料压缩时常需要较高温度和较大压力才能达到预期的成型效果,其较高的能耗制约了相关农林废弃物的再利用。由于单一物料在资源量及性能指标方面相对欠缺^[10-12],使得农林废弃物混配成型成为了该领域研究的未来发展方向之一。本研究拟对农林废弃物混配成型后进行资源化利用的研究现状进行综述,探讨将不同理化特点的农林废弃物分类后,混配实现组分互补,进而改善单一物料成型能力与品质的可行性;同时提出借助力学特性试验、显微形貌观测、物理性能测试等手段,多尺度分析混合物料成型机理及条件的对策;旨在为解决农林废弃物加工成型能耗大、处理成本高、再利用率低等问题提供思路与关键方法。

1 混配成型条件下农林废弃物资源化利用研究现状

农林废弃物中不仅含有丰富的有机质、营养素、矿物质等成分,而且含有纤维、粗蛋白、淀粉等大量可燃物质,故其资源化利用在燃料化与饲料化方面起步较早,相关研究也较多。此外,作为生物质残留,农林废弃物具有很好的可降解性,经过恰当处理可自然降解成无害有机物质而被土壤等吸收利用,因此随着加工技术的不断发展,近年来材料化利用逐渐成为了农林废弃物资源化利用的新途径,用于制作生物质复合材料等。

1.1 燃料化利用研究现状

我国农林废弃物逐年增多,利用其制备生物质燃料已成为处理这些废弃物最方便、最直接的方式。生物质燃料是以农林废弃物为原料,经粉碎、干燥、混合、挤压、固化成型等工艺,制成的具有一定形状(块状、棒状、颗粒状)的燃料,虽可直接进行燃烧,但也存在燃烧不充分、燃烧热值低、成型困难、生产成本高等问题。为解决上述问题,提高生物质成型燃

料品质,增加农林废弃物有效利用途径,国内外近年来从混配成型角度进行了探索性的研究尝试:1)利用农林废弃物混配成型优化生物质燃料的燃烧性能指标,例如燃烧热值、灰分含量^[13-14]、燃尽率、着火点^[15]、燃烧速率^[16]等。已有研究大多选择燃烧热值较高的煤粉^[17-19]、木屑^[20-22]等作为混配成型燃料的组分,利用其燃烧热值高的特点,与燃烧特性差的农林废弃物形成互补,提升混合生物质的整体燃烧品质与机械物理性能。2)利用多种农林废弃物混配成型时,选择将松散、致密化成型难的物料与含水率高、粘结性强、成型容易的物料按比例混合^[23-25],在特点上形成互补的同时,以物料本身作为天然粘结剂替代人工粘结剂,以降低成型能耗^[26-28],制备低成本、高品质的生物质成型燃料。混配成型燃料的常见原料组成及代表性研究成果见表1。

1.2 饲料化利用研究现状

农林废弃物中的植物类废弃物(如秸秆、柠条等),因其来源和分布广泛、产量大、成本低且含有粗蛋白、粗脂肪、各种氨基酸、微量元素等成分,在我国北方地区常被用作饲料的主要原料进行生产加工,用于饲喂家畜,以解决当前饲草料短缺的问题;但由于秸秆、柠条等植物类废弃物的粗纤维含量高、适口性差,即使切短、揉碎后饲喂,也会出现采食率低、消化率低等问题,单一饲喂效果不佳,因此相关研究常用其部分替代粗料,混配制备饲料颗粒,分析饲喂效果;谢立宏等^[29]制备全混复合秸秆颗粒饲料时发现,在温度、水分和压力综合作用下,饲料原料中淀粉发生糊化、酶活性增强,从而促进饲料更有效地被羊消化吸收,并转化为体重的增加,因此与常规饲料相比复合颗粒饲料能显著提高羊的产肉性能、增重速度和出栏率;王昊等^[30]分析了环模模孔直径、长径比对复合饲料颗粒硬度及饲喂效果的影响,发现模孔直径与长径比均显著影响颗粒硬度,进而影响肉鸡的消化率及日增重,并给出了生产肉鸡饲料适宜选用的环模直径;朝鲁孟其其格^[31]将苜蓿与柠条、秸秆分别混合后压制草颗粒,通过正交试验得到了两种混合草物料成型的最佳工艺,并发现混草颗粒很好地改善了秸秆与柠条的适口性,其采食量明显高于单独饲喂秸秆颗粒或柠条颗粒。此外,对饲喂效果进一步调查分析发现,畜禽混合日粮中每种饲料并非单独存在,而是以某种方式相互作用、影响,即组合效应^[32-33],通过合理搭配各种饲料原料可以充分利用这种效应,以发挥出混配成型饲料的最

表 1 混配成型燃料的原料组成及代表性研究成果汇总

Table 1 Material composition and representative research results of blended fuel briquettes

参考文献 Reference	原料组成 Material composition	混配成型研究代表性成果 Representative results of briquetting research under the condition of blending
[10]	锯末、水葫芦纤维	借助水葫芦纤维的粘结作用,可减小燃料颗粒的变形回弹,提高松弛密度。
[11]	锯末、玉米芯碎料	两种物料混配后,可明显提升成型燃料的松弛密度、抗压强度等指标。
[12]	锯末、草粉	混配成型颗粒的强度大小与尺寸大小呈反比,且耐久性强于单一物料成型颗粒。
[14],[22]	木屑、稻秸	混入木屑后,燃料的成型密度、成型压力、跌落强度、燃烧值、灰分含量均有明显改善;与单一稻秸成型燃料相比,木屑与稻秸质量比为 1:1 的混合成型燃料有更好的物理性能。
[20]	木屑、菜籽饼	菜籽饼含量越高,混合物料成型能耗越低,颗粒机械耐久性越差、体密度越低。
[15]	薏苡秸秆、煤	薏苡秸秆提高了混合型煤的抗压强度,使其具有着火点低、燃尽率高、热效应好等优点。
[18]	木屑、粉煤	热压方式有利于混合物料成型,可以制成性能稳定的生物质型煤。
[19]	秸秆沼渣、褐煤	与秸秆相比,沼渣更易与褐煤混配成型,其型煤的抗压强度高于玉米秸秆型煤。
[16]	桉树木屑、煤	通过方差与极差分析得到了混合燃料物理性能及燃烧性能综合最优时的配比等条件。
[23]	薯渣、荞麦壳	薯渣含量不高于 20%时,混合物料颗粒的密度、耐久性可满足相关标准要求。
[24]	落叶碎料、藻类植物	温度为 80 °C 时,在 100、150、200 MPa 压力下均可以成型。
[25]	豆秸、玉米芯碎料	混配改善了物料力学性能,可在较低温度、较大颗粒时成型,80 °C 为较佳成型温度。
[27]	玉米秸秆、花生壳	混配后改善了秸秆的成型密度及能耗,且物料含水率为 9%时成型效果与耐久性较好。

佳饲喂效果;已有研究注意到了组合效应对饲料养分及饲喂效果的影响,提出在常规制粒工艺下,制粒质量的提升不应以牺牲营养质量为代价^[34],因此需要寻找新方法兼顾饲料颗粒物理质量与养分。

除饲喂效果外,混配成型饲料的成型质量是该领域研究的另一热点,其直接影响饲料的生产、储运与饲喂,目前主要集中在以颗粒密度、硬度、抗碎率、成型率、粉化率等为指标^[35-37],以含水率、配比、粒度、模孔直径等为影响因素的成型试验研究^[38-39]与工艺分析研究^[40-41]等方面,相关研究的主要原料组成及成果见表 2。

1.3 材料化利用研究现状

混配成型条件下农林废弃物的材料化利用主要集中于制备生物质复合材料,即通过多种农林废弃物混合或农林废弃物与其他物料混合的方式,采用一定加工方法,获得多功能、高性能及高附加值的新材料。例如,制备木塑复合材料、热塑性淀粉基复合材料时,常以秸秆、稻壳、薯渣、木屑等农林废

弃物中的植物纤维作为增强体^[42],在一定条件下与树脂、塑料等混合,再经过平压、模压方法生产出板材及型材用于家具装饰、建材、包装等行业^[43-45]。由于复合材料需要具备良好的力学、物理性能和一些其他特殊性能,因此已有试验研究常在农林废弃物等原料中添加粘结剂、溶胀剂、增塑剂等辅助添加物以增强材料的品质及功能,并通过研究其成型后的力学物理性能、从微观角度分析不同物料间的界面结合机理^[46-48],得到生物质复合材料的原料最优配比及最佳成型工艺参数。

随着各行业对生物质复合材料环保性要求的提高,以及对林木资源保护力度的加大,复合材料的增强体原料已逐渐由木材拓展至稻壳、秸秆^[49-51]等资源量丰富的低成本农林废弃物^[52-53];而复合材料中的粘结剂、改性剂等人工添加剂,也逐渐以更环保、更安全的天然可降解物质替代^[54-55],并通过较为环保的改性处理方法,增强复合材料界面结合能力及性能,相关研究的原料组成及成果见表 3。

表2 混配成型饲料的原料组成及代表性研究成果汇总

Table 2 Material composition and representative research results of blended feed briquettes

参考文献 Reference	原料组成 Material composition	混配成型研究代表性成果 Representative results of briquetting research under the condition of blending
[35]	麦秸、玉米	发现精粗料配比是影响颗粒成型的主要因素,得到了成型效果较优的原料含水率及粒度。
[36]	玉米秸秆、麦秸、苜蓿	相同粒度、配比、含水率下,多组分混合饲料颗粒的成型率、抗碎程度、密度均好于单组分饲料颗粒。
[37]	苜蓿、燕麦、油菜秆、玉米秸秆	相同条件下,三种混压饲料块的成型率、抗碎程度和密度均高于单一秸秆饲料块。
[38],[39]	玉米、豆粕、麦麸	构建了混合饲料主要原料的力学流变学模型,获得了模型参数与成型密度、硬度、成型率的关系,同时发现混合饲料的成分变化对上述指标有显著影响。
[40]	玉米秸秆、玉米粉	发现水分与精料率对混合饲料的成型率、抗碎性影响显著,得到了最佳工艺参数组合。
[41]	草粉、秸秆、秕壳、甜菜渣	提出可根据需要加工单一型或复合型牛、羊颗粒饲料,并给出了制备复合型颗粒饲料的配方建议、制粒方式及参数。

表3 生物质复合材料的原料组成及代表性研究成果汇总

Table 3 Material composition and representative research results of blended biocomposite

参考文献 Reference	原料组成 Material composition	混配成型研究代表性成果 Representative results of briquetting research under the condition of blending
[46]	秸秆、稻壳、花生壳、骨胶	秸秆类原料复合材料界面相容性和力学性能较好,壳质类复合材料耐热性能较好。
[49]	玉米秸秆、废纸发泡材料	优化了材料的胶黏剂配方,确定了秸秆最佳含量。
[50]	杨木粉和稻壳、棉秆、秸秆	生物质的加入会增加复合材料强度,减弱其弹性变形能力。
[52]	剑麻、稻草纤维、淀粉	通过微观分析得到了植物纤维分子与淀粉基质分子之间氢键的强弱对比。
[53]	稻秆、木屑	得到了不同稻秸含量对复合板机械物理性能及声学特性的影响。
[54]	剑麻纤维、淀粉	制备出了淀粉基生物质缓冲包装材料,揭示了其性能变化的微观机制。
[55]	锯末、食物残渣	提出食物残渣中所含淀粉有助于复合板材的热压成型。

2 混配成型条件下农林废弃物资源化利用的发展对策分析

2.1 燃料化利用存在问题及发展对策分析

在利用农林废弃物混配压制燃料的已有研究中,常选择煤粉、木屑等作为原料的主要组分,虽然能够提高混合生物质燃料整体的燃烧热值,但也带来了制约其发展的一些问题:例如煤粉作为不可再生能源,与农林废弃物混合燃烧后,仍存在污染排放严重、加速化石能源消耗等问题;又如锯末、木屑等

富含木质素的农林废弃物,常温下冷压较难成型,只有当温度达到 150 ℃ 以上木质素发生软化后,才会产生胶粘性物质促进成型,因此当前研究多采用高温热压成型的方式对含木质素类物料进行混压,制备燃料颗粒,其能耗大、成本高,制约了混合生物质成型燃料的再利用发展。

如何结合不同农林废弃物的物性特点,通过混配手段降低压制燃料颗粒、燃料棒的成型温度,以低成本加工方法提升其成型与燃烧品质,将成为制备混合生物质燃料的关键。在降低成型温度方面,

由于农林废弃物成分中的淀粉、蛋白质等在一定温度下会产生粘结作用,因此有研究表明80℃左右温度范围内相关农林废弃物料的混配成型效果较好^[24-26],而该温度范围理论上通过加工设备工作时产生的热量就可以达到。鉴于此,如果能从研究物料颗粒间的天然粘结机制入手,深入分析混合物料的微细观成型机理,充分发掘农林废弃物自身潜力,进一步改善其成型温度条件及工艺,并以此指导混合成型燃料的生产加工,其研究成果将在一定程度上解决制备成型燃料能耗高的问题。在提升燃烧品质方面,除了通过物理或化学方法对农林废弃物进行预处理提升其燃烧热值外,还要考虑以低成本的物料混配方法促进物料颗粒间的天然粘结,改进与发展致密成型技术手段,通过进一步增大成型燃料密度来提升燃烧品质。

2.2 饲料化利用存在问题及发展对策分析

利用混配成型制备块状、颗粒状饲料,不仅节省了贮运空间,减少了饲喂中的浪费,还解决了由于农林废弃物种类单一带来的饲料营养不均衡、适口性差、采食及消化率低的问题;但随着研究的深入,越来越多的学者发现,若要进一步提升畜禽采食率、消化率及日增重,充分发挥混配成型饲料的最佳性能,就必须分析利用混配成型饲料中各组分间的组合效应,但如何利用这种效应仍是未来该领域研究的主要任务。例如含有淀粉、蛋白质的植物类废弃物在制粒时受机器温度影响,其所含淀粉会出现凝胶、蛋白质会发生变性^[56-57],从而使混合物料的营养成分、成型能力等发生改变,如何控制或促进这种改变,利用其带来有益的组合效应将十分关键。

除营养成分的组合效应外,如何进一步改善混合饲料块或颗粒的成型质量、降低加工成本是目前该领域研究所面临的另一主要问题。已有研究多从颗粒物理性能测试、力学特性分析、加工条件及工艺优化等宏观角度入手,寻找改善混配成型饲料颗粒质量的途径;而结合农林废弃物自身成分特点,从微细观角度分析混配成型机理、提升成型质量的研究较少。Nalladurai等^[58]曾在研究秸秆类草物料成型过程中指出:农林废弃物中木质素、淀粉、蛋白质等成分可在一定条件下转化为天然粘结剂(Natural Binder),在物料颗粒间架桥(solid bridge),形成机械互锁式结构。因此,分析利用不同物料颗粒间的天然粘结作用机理,在不增加甚至是降低加工成本的基础上改善混合饲料块或颗粒的成型质量,将使

混配成型饲料的优越性得到进一步发挥。

2.3 材料化利用存在问题及发展对策分析

与饲料化、燃料化利用相比,在制备复合材料前,作为主要原料的农林废弃物常需要经过干燥、制粉、碱处理、表面改性、微波处理等各种复杂预处理工序,导致其产品生产工艺复杂、加工成本较高,不利于材料化利用途径的进一步推广与发展。此外,为了保证复合材料质量、提升界面结合性能,大部分研究进行试验时常在农林废弃物原料中添加各类人工粘结剂、改性剂、塑化剂等,不仅增加了成本,还对所生产材料的绿色环保性能产生了一定影响。因此,应继续从拓展原料及添加剂种类的角度降低复合材料生产成本、提升其环保性能。

此外,生物质复合材料的混配成型技术也应得到进一步的重视。从目前研究现状来看,农林废弃物制备复合材料的相关研究主要涉及产品力学物理特性分析与微观组织结构分析两方面,而对于复合材料成型过程中其混合原料的机械特性、流变特性、力传递机制的研究尚鲜;因此若能从农林废弃物原料力学特性研究入手,分析得到混合物料成型能力及条件,并与微观结构分析对比映证,其研究结果势必会进一步推动生物质复合材料的组分优化,以提升产品性能、降低加工成本。

3 结束语

一直以来,制约农林废弃物压缩成型的问题集中在成型品质低、加工成本高、资源化利用效果差等几个方面,混配成型方式的出现为解决上述问题提供了思路,其作用在于可以通过混配将不同物料的理化特点结合起来进行互补,充分发掘农林废弃物自身潜力,改善成型能力、降低加工成本的同时,提升其使用性能以满足资源化利用需求。因此,根据当前农林废弃物资源化利用途径及现状,在选择物料进行混配成型研究时提出如下建议:1)将干燥松散、较难成型的物料与不易脱水、胶粘性强的物料混配,发挥物料的天然粘结作用,提升物料成型能力,解决当前资源化利用过程中普遍存在的热压成型温度高、人工粘结成本高的问题,降低成型能耗;2)将燃烧热值高、着火点低的物料与容易致密成型、燃烧特性差的物料混配,提升混合物料燃烧品质的同时,解决其燃料化利用过程中存在的成型密度低、耐久性差等问题;3)将松散、粗纤维含量高的物料与易于成型、适口性好、采食消化率高的物料混配,解决饲

料化利用过程中颗粒饲料物理质量与营养质量难以兼顾、营养不均衡、浪费严重等问题,充分发挥混配成型饲料各组分间的组合效应;4)将含有可以替代化工类粘结剂、溶胀剂、增塑剂、改性剂成分的物料与其他农林废弃物进行混配,减少非环保型辅助添加剂的使用,解决材料化利用过程中遇到的可降解能力差、环保性能差等问题。

利用混配成型思路解决农林废弃物资源化利用过程中遇到的问题,关键还在于能否解析得到混配成型过程中不同物料颗粒间的粘结机制与微观作用机制,这方面的分析探索将成为未来该领域研究的重点,其研究过程可与物料混配成型工艺研究、产品力学物理性能研究结合在一起,通过多尺度分析对农林废弃物混配成型机理进行探索,以充分发挥混配成型在农林废弃物资源化利用过程中的作用。

参考文献 References

[1] 谢光辉,方艳茹,李嵩博,李蒙,杨阳,傅童成,包维卿. 废弃生物质的定义、分类及资源量研究述评[J]. 中国农业大学学报, 2019, 24(8): 1-9
Xie G H, Fang Y R, Li S B, Li M, Yang Y, Fu T C, Bao W Q. Review of the definition, classification, and resource assessment of biowaste[J]. *Journal of China Agricultural University*, 2019, 24(8): 1-9 (in Chinese)

[2] 陈卫红,石晓旭. 我国农林废弃物的应用与研究现状[J]. 现代农业科技, 2017(18): 148-149
Chen W H, Shi X X. Application and research status of agricultural and forestry waste in China [J]. *Modern Agricultural Science and Technology*, 2017(18):148-149 (in Chinese)

[3] 王春光,杨明韶,高焕文. 农业纤维物料压缩研究发展现状[J]. 中国农业大学学报, 1996, 1(6): 14-18
Wang C G, Yang M S, Gao H W. Compression of agricultural fibrous materials [J]. *Journal of China Agricultural University*, 1996, 1(6): 14-18 (in Chinese)

[4] 姜洋,曲静霞,潘亚杰,何光设. 生物质致密成型技术处理木材加工废弃物的应用[J]. 人造板通讯, 2004, 11(2): 13-14, 21
Jiang Y, Qu J X, Pan Y J, He G S. Application of biomass compact molding technology in the treatment of wood processing waste [J]. *China Wood-Based Panels*, 2004, 11(2): 13-14, 21 (in Chinese)

[5] 李晓江. 生物质型煤混合成型机理建模及工况优化研究[D]. 北京:华北电力大学, 2012
Li X J. Research on mechanism modeling and condition optimization for compression process of biomass compound coal [D]. Beijing: North China Electric Power University, 2012 (in Chinese)

[6] 郭康权,赵东,查养社,柴春祥. 植物材料压缩成型时粒子的变形及结合形式[J]. 农业工程学报, 1995, 11(1): 138-143
Guo K Q, Zhao D, Zha Y S, Chai C X. Particles deformation and combination model of the biomass materials in the compressing and forming process [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 1995, 11(1): 138-143 (in Chinese)

[7] 王春光,杨明韶,高焕文,李林,李旭英. 牧草在高密度压捆时的应力松弛研究[J]. 农业工程学报, 1997, 13(3): 48-52
Wang C G, Yang M S, Gao H W, Li L, Li X Y. Study on stress relaxation of hay during baling under high density[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 1997, 13(3): 48-52 (in Chinese)

[8] 赵东,黄文彬,郭康权. 玉米秆粉粒体压制成型模型的研究[J]. 西北农业大学学报, 1998, 26(5): 44-47
Zhao D, Huang W B, Guo K Q. Research on the compaction modelling of corn stalk powder[J]. *The Journal of Northwest Agricultural University*, 1998, 26(5): 44-47 (in Chinese)

[9] 盛奎川,钱湘群,吴杰. 切碎棉秆高密度压缩成型的试验研究[J]. 浙江大学学报:农业与生命科学版, 2003, 29(2): 139-142
Sheng K C, Qian X Q, Wu J. Experimental studies on compressing chopped cotton stalks to high densities [J]. *Journal of Zhejiang Agricultural University: Agriculture & Life Sciences*, 2003, 29(2): 139-142 (in Chinese)

[10] Kong L J, Zhang X F, Tian S H, Liu T, Xiong Y. Preparation and characterization of sawdust derived bio-fuel pellets depending on "solid bridge" intertwining action of hyacinth fiber[J]. *Advanced Materials Research*, 2014, 878: 450-458

[11] Mitchual S J, Frimpong-Mensah K, Darkwa N A. Relationship between physico-mechanical properties, compacting pressure and mixing proportion of briquettes produced from maize cobs and sawdust [J]. *Journal of Sustainable Bioenergy Systems*, 2014, 4(1): 50-60

[12] Harun N Y, Afzal M T. Chemical and mechanical properties of pellets made from agricultural and woody biomass blends [J]. *Transactions of the ASABE*, 2015, 58(4): 921-930

[13] Stasiak M, Molenda M, Bańda M, Wiącek J, Parafiniuk P, Gondek E. Mechanical and combustion properties of sawdust: Straw pellets blended in different proportions [J]. *Fuel Processing Technology*, 2017, 156:366-375

[14] Rahaman S A, Salam P A. Characterization of cold densified rice straw briquettes and the potential use of sawdust as binder [J]. *Fuel Processing Technology*, 2017, 158: 9-19

[15] 龙尚俊,刘贵云,田乙卜,周元敬. 生物质苕荻秸秆型煤的制备及其燃烧性能研究[J]. 贵州科学, 2018, 36(3): 60-63
Long S J, Liu Y G, Tian Y B, Zhou Y J. Production of biomass briquette by coixseed straw and study on its combustion performance[J]. *Guizhou Science*, 2018, 36(3): 60-63 (in Chinese)

[16] 别星辰. 桉树木屑型煤燃烧特性研究[D]. 南京:南京林业大学, 2017
Bie X C. Research on combustion characteristics of fuels made

- by Eucalyptus sawdust and hard coal[D]. Nanjing: Nanjing Forestry University, 2017 (in Chinese)
- [17] Özyüğüran A, Acema H H, Dahiloğlu E. Production of fuel briquettes from rice husk-lignite blends[J]. *Environmental Progress & Sustainable Energy*, 2017, 36(3): 742-748
- [18] 杜渐. 煤与生物质热压成型机理研究[J]. *煤炭工程*, 2015, 47(1): 115-117
Du J. Mechanism study of coal-biomass hot briquetting[J]. *Coal Engineering*, 2015, 47(1): 115-117 (in Chinese)
- [19] 闫芳. 玉米秸秆厌氧发酵及其沼渣与褐煤共制备生物质型煤研究[D]. 北京:中国石油大学, 2017
Yan F. Preparation of bio-briquette by lignite and digestate after anaerobic digestion of corn straw [D]. Beijing: China University of Petroleum, 2017 (in Chinese)
- [20] Ståhl M, Berghe J. Energy efficient pilot-scale production of wood fuel pellets made from a raw material mix including sawdust and rapeseed cake[J]. *Biomass and Bioenergy*, 2011, 35(12): 4849-4854
- [21] Monedero E, Portero H, Lapuerta M. Pellet blends of poplar and pine sawdust: Effects of material composition, additive, moisture content and compression die on pellet quality[J]. *Fuel Processing Technology*, 2015, 132: 15-23
- [22] 涂德浴, 李安心, 何贵生. 水稻秸秆与木屑混合原料热压成型试验[J]. *农业工程学报*, 2015, 31(20): 205-211
Tu D Y, Li A X, He G S. Hot pressing forming experiment of the rice straw and sawdust mixed material[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2015, 31(20): 205-211 (in Chinese)
- [23] Obidziński S. Utilization of post-production waste of potato pulp and buckwheat hulls in the form of pellets[J]. *Polish Journal of Environmental Studies*, 2014, 23(4): 1391-1395
- [24] Tippayawong N, Jaipa C, Kwanseng K. Biomass pellets from densification of tree leaf waste with algae[J]. *Agricultural Engineering International: The CIGR Journal*, 2018, 20(4): 119-125
- [25] Okot D K, Bilsborrow P E, Phan A N. Briquetting characteristics of bean straw-maize cob blend[J]. *Biomass and Bioenergy*, 2019, 126: 150-158
- [26] Wang Y, Wu K, Sun Y. Pelletizing properties of wheat straw blending with rice straw[J]. *Energy & Fuels*, 2017, 31(5): 5126-5134
- [27] Gong C X, Lu D H, Wang G H, Tabil L, Wang D C. Compression characteristics and energy requirement of briquettes made from a mixture of corn stover and peanut shells[J]. *Bioresources*, 2015, 10(3): 5515-5531
- [28] 李伟振, 姜洋, 饶曙, 阴秀丽, 蒋恩臣. 玉米秸秆和木屑及木钠混配成型工艺参数优化[J]. *农业工程学报*, 2018, 34(1): 198-203
Li W Z, Jiang Y, Rao S, Yin X L, Jiang E C. Parameter optimization of corn stover blended with sawdust and sodium lignosulphonate compression experiments[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2018, 34(1): 198-203 (in Chinese)
- [29] 谢立宏, 杨肖, 马金昕, 赵洁, 王小军. 全混合复合秸秆颗粒饲料饲喂肉羊效果对比试验[J]. *黑龙江畜牧兽医*, 2015(18): 152-153
Xie L H, Yang X, Ma J X, Zhao J, Wang X J. A comparative study on the effect of the fully mixed compound straw pellet feed on sheep [J]. *Heilongjiang Animal Science and Veterinary Medicine*, 2015(18): 152-153 (in Chinese)
- [30] 王昊, 于纪宾, 于治芹, 李俊, 李军国. 环模模孔参数对颗粒饲料加工质量及肉鸡生长性能的影响[J]. *动物营养学报*, 2017, 29(9): 3352-3358
Wang H, Yu J B, Yu Z Q, Li J, Li J G. Effects of ring die parameters on pellet quality and growth performance of broilers[J]. *Chinese Journal of Animal Nutrition*, 2017, 29(9): 3352-3358 (in Chinese)
- [31] 朝鲁孟其其格. 混合草颗粒制粒技术及饲用价值评价的研究[D]. 呼和浩特:内蒙古农业大学, 2010
Chao L. Study on granulating technique and feeding evaluation of mixed forage particles [D]. Hohhot: Inner Mongolia Agricultural University, 2010 (in Chinese)
- [32] 刘志刚. 饲草料混合草颗粒组合效应研究[D]. 呼和浩特:内蒙古农业大学, 2009
Liu Z G. Study on the associative effects of mix grass pellet of forage grass and feed [D]. Hohhot: Inner Mongolia Agricultural University, 2009 (in Chinese)
- [33] 马惠茹, 陈艳君. 内蒙古巴彦淖尔市典型粗饲料资源调查与思考[J]. *饲料研究*, 2013(12): 72-75
Ma H R, Chen Y J. Investigation and consideration of typical roughage resources in Bayannur City of Inner Mongolia[J]. *Feed Research*, 2013(12): 72-75 (in Chinese)
- [34] Abdollahi M R, Ravindran V, Svihus B. Pelleting of broiler diets: An overview with emphasis on pellet quality and nutritional value[J]. *Animal Feed Science and Technology*, 2013, 179(1-4): 1-23
- [35] 张杰, 李浩, 孔令卓, 帕合尔鼎, 苏剑, 马娟, 冯斌. 秸秆配合颗粒饲料制粒加工工艺参数的试验研究[J]. *新疆农业科学*, 2017, 54(7): 1313-1322
Zhang J, Li H, Kong L Z, Paherding, Su J, Ma J, Feng B. Experimental study on processing parameters of granulation of stalk combined pellet feed [J]. *Xinjiang Agricultural Sciences*, 2017, 54(7): 1313-1322 (in Chinese)
- [36] 马堃杰, 权金鹏, 甘辉林, 王鹏, 顾新民, 安晓娟, 宋福超. 肉牛不同生长阶段秸秆型 TMR 颗粒饲料配方研发与试验[J]. *中国牛业科学*, 2016, 42(3): 18-21
Ma Y J, Quan J P, Gan H L, Wang P, Gu X M, An X J, Song F C. Development and test of bovine straw TMR pellet feed formula in the different growth stages of beef cattle[J]. *China Cattle Science*, 2016, 42(3): 18-21 (in Chinese)
- [37] 宋福超, 魏玉兵, 权金鹏. 秸秆块(粒)状压缩饲料全营养混合日粮生产试验[J]. *中国牛业科学*, 2017, 43(2): 21-24
Song F C, Wei Y B, Quan J P. Production test of straw block (grain) compression feed total nutrition mixed ration [J]. *China Cattle Science*, 2017, 43(2): 21-24 (in Chinese)
- [38] 陈啸, 王红英, 方鹏, 金楠, 段恩泽, 陈计远, 郑猛虎. 基于混料设计的原料成分对颗粒饲料产品成型特性的影响[J]. *饲料工业*, 2018, 39(9): 7-13

- Chen X, Wang H Y, Fang P, Jin N, Duan E Z, Chen J Y, Zheng M H. Effect of ingredient content on forming properties of pellet feed basing on mixture design[J]. *Feed Industry*, 2018, 39(9): 7-13 (in Chinese)
- [39] 陈啸, 孔丹丹, 王红英, 方鹏. 基于本构模型的颗粒饲料成型特性研究[J]. *农业工程学报*, 2017, 33(23): 267-275
- Chen X, Kong D D, Wang H Y, Fang P. Analysis of forming properties based on pellet feed forming constitutive model[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2017, 33(23): 267-275 (in Chinese)
- [40] 任广跃, 杜晓彦, 段续, 贾朋君, 张仲欣. 玉米秸秆颗粒饲料成型工艺优化[J]. *粮食与饲料工业*, 2012(11): 45-47, 54
- Rsen G Y, Du X Y, Duan X, Jia P J, Zhang Z X. The optimization of forming process of corn straw pellet feed[J]. *Cereal & Feed Industry*, 2012(11): 45-47, 54 (in Chinese)
- [41] 吴红岩, 杨建中. 秸秆颗粒饲料的加工成型调制技术[J]. *畜禽业*, 2018, 29(8): 41, 43
- Wu H Y, Yang J Z. Processing and mixed briquetting technology of straw pellet feed[J]. *Livestock and Poultry Industry*, 2018, 29(8): 41, 43 (in Chinese)
- [42] 陈蕾, 钱哲宇, 雷文, 干惠娟, 龙剑英. 植物纤维/不饱和聚酯树脂复合材料的研究进展[J]. *广州化学*, 2019, 44(1): 66-72
- Chen L, Qian Z Y, Lei W, Gan H J, Long J Y. Research development of unsaturated polyester resin/plant fiber composite[J]. *Guangzhou Chemistry*, 2019, 44(1): 66-72 (in Chinese)
- [43] 陈杰. 木薯渣/PBS可生物降解复合材料的制备与性能研究[D]. 南宁: 广西大学, 2018
- Chen J. Preparation of cassava residues/PBS biodegradable composites and its performance research [D]. Nanning: Guangxi University, 2018 (in Chinese)
- [44] Rahman K S, Islam M N, Rahman M M, Hannan M O, Dungani R, Khalil H A. Flat-pressed wood plastic composites from sawdust and recycled polyethylene terephthalate (PET): Physical and mechanical properties[J]. *Springer Plus*, 2013, 2(1): 629
- [45] Kazemi Najafi S, Tajvidi M, Hamidina E. Effect of temperature, plastic type and virginity on the water uptake of sawdust/plastic composites[J]. *Holz als Roh- und Werkstoff*, 2007, 65(5): 377-382
- [46] 王敏, 何春霞, 朱贵磊, 张建. 不同植物纤维/骨胶复合材料的性能对比[J]. *复合材料学报*, 2017, 34(5): 1103-1110
- Wang M, He C X, Zhu G L, Zhang J. Performance comparison of different plant fibers/bone glue composites[J]. *Acta Materiae Compositae Sinica*, 2017, 34(5): 1103-1110 (in Chinese)
- [47] 邹玉. 秸秆木塑复合材料的制备与性能[D]. 济南: 济南大学, 2018
- Zou Y. Preparation and properties of wood plastic composites by corn stalk [D]. Jinan: University of Jinan, 2018 (in Chinese)
- [48] 李东昶. 稻壳/PVC基木塑复合材料增韧改性的探究[D]. 南京: 南京农业大学, 2017
- Li D C. Toughening modification of rice husk/PVC-based wood-plastic composites [D]. Nanjing: Nanjing Agricultural University, 2017 (in Chinese)
- [49] 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
- Gao Y. Study on cornstalks enhanced plant fiber foaming materials [D]. Hohhot: Inner Mongolia Agricultural University, 2016 (in Chinese)
- [50] 杨科研. 典型生物质/聚乙烯复合材料制备与性能研究[D]. 淄博: 山东理工大学, 2016
- Yang K Y. Preparation and properties of typical biomass-polyethylene composites [D]. Zibo: Shandong University of Technology, 2016 (in Chinese)
- [51] 张波. 农业废弃物秸秆生产人造板的资源化利用[J]. *中国胶粘剂*, 2013, 22(12): 46-49
- Zhang B. Resource recycling of agricultural waste straw for producing artificial board[J]. *China Adhesives*, 2013, 22(12): 46-49 (in Chinese)
- [52] 刘鹏, 李方义, 李剑峰, 郭安福, 张传伟, 王成钊. 植物纤维增强的生物质复合材料微观机理及力学性能研究[J]. *功能材料*, 2015, 46(11): 11017-11020, 11026
- Liu P, Li F Y, Li J F, Guo A F, Zhang C W, Wang C Z. The micro-mechanism and mechanical properties of the biomass composites reinforced with plant fiber [J]. *Journal of Functional Materials*, 2015, 46(11): 11017-11020, 11026 (in Chinese)
- [53] Yang H S, Kim D J, Kim H J. Rice straw-wood particle composite for sound absorbing wooden construction materials [J]. *Bioresource Technology*, 2003, 86(2): 117-121
- [54] 陈帅. 生物质缓冲包装材料淀粉改性机理及防水性能研究[D]. 济南: 山东大学, 2019
- Chen S. Research on the starch modification mechanism and waterproof performance of biomass buffer packaging materials [D]. Jinan: Shandong University, 2019 (in Chinese)
- [55] Vakalis S, Moustakas K, Semitekolos D, Novakovic J, Malamis D, Zoumpoulakis L, Loizidou M. Introduction to the concept of particleboard production from mixtures of sawdust and dried food waste[J]. *Waste and Biomass Valorization*, 2018, 9(12): 2373-2379
- [56] Briggs J L, Maier D E, Watkins B A, Behnke K C. Effect of ingredients and processing parameters on pellet quality[J]. *Poultry Science*, 1999, 78(10): 1464-1471
- [57] Thomas M, Huijnen P T H J, van Vliet T, van Zuilichem D J, van der Poel A F B. Effects of process conditions during expander processing and pelleting on starch modification and pellet quality of tapioca[J]. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 1999, 79(11): 1481-1494
- [58] Kaliyan N, Morey R V. Natural binders and solid bridge type binding mechanisms in briquettes and pellets made from corn stover and switchgrass[J]. *Bioresource Technology*, 2010, 101(3): 1082-1090