

桉树皮和桑枝制备颗粒燃料成型工艺研究*

Research on Pelletization Process of Eucalyptus Bark and Ramulus Mori as Biomass Pellet Fuel

黎演明¹, 黄志民¹, 韦光贤², 李俊晓²

LI Yan-ming¹, HUANG Zhi-min¹, WEI Guang-xian², LI Jun-xiao²

(1. 广西科学院, 非粮生物质酶解国家重点实验室, 国家非粮生物质能源工程技术研究中心, 广西生物炼制重点实验室, 广西南宁 530007; 2. 广西桂森生物能源技术有限公司, 广西南宁 530100)

(1. State Key Laboratory of Non-food Biomass Enzyme Technology, National Engineering Research Center for Non-food Biorefinery, Guangxi Key Laboratory of Biorefinery, Guangxi Academy of Sciences, Nanning, Guangxi, 530007, China; 2. Guangxi GuiSen Bioenergy Technology Co., LTD, Nanning, Guangxi, 530100, China)

摘要:【目的】利用广西栽桑养蚕和造纸加工行业每年产生的大量生物质剩余物, 高效制备用于供热领域的颗粒燃料。【方法】以桉树皮(Eucalyptus Bank, EB)和桑枝(Ramulus Mori, RM)作为原料制备生物质颗粒燃料, 分析生物质原料的种类、环模孔长径比、颗粒大小、原料含水率以及添加剂含量对颗粒燃料成型效率的影响。【结果】添加少量的木质素粘结剂可以降低生物质原料的成型压力, 当原料的含水率为16%~20%, 颗粒度为4 mm, 环模孔长径比为4.5:1, 粘结剂添加量为5%时两种生物质原料都可有效成型, 所制备的颗粒燃料的密度 ≥ 1.1 g/cm³, 机械耐久性 $\geq 95\%$ 。【结论】本研究工艺成型率高, 获得的颗粒燃料符合生物质燃料要求。

关键词: 颗粒燃料 桉树皮 桑枝 成型工艺

中图分类号: TK6 文献标识码: A 文章编号: 1005-9164(2015)06-0658-06

Abstract:【Objective】Large volumes of residual biomass (mainly eucalyptus bark and ramulus mori) are generated by sericulture industrial and paper processing plants in Guangxi. The aim of the present study was to use those biomass wastes to produce high-quality pellet fuel, in order to use them as fuel supply for thermal applications.【Methods】The key factors affecting the pelletizing molding ratio in Eucalyptus Bark and Ramulus Mori pelletization processes were identified. The impacts of raw material type, length-diameter ratio of ring die, pellet size, lignin additives content, particle size and moisture content on pelletizing molding ratio were studied using a ring die pellet mill.【Results】It was shown that the pelletizing pressure decreased exponentially with a small amount lignin additive. When length-diameter ratio of ring die, particle size, moisture content and lignin additives content were 4.5:1, 4 mm, 16%~20% and 5% wt, respectively, the optimum conditions were obtained, by which the density and durability of produced pellets reached more than 1.1 g/cm³ and 95%.【Conclusion】Satisfied pelletizing molding ratio can be obtained under this optimum pelletizing process, and the pellets quality meets the criteria of biomass pellet fuel.

Key words: pellet fuel, Eucalyptus Bank, Ramulus Mori, pelletization processes

收稿日期: 2015-04-14

修回日期: 2015-06-25

作者简介: 黎演明(1985—), 男, 助理研究员, 主要从事生物质能源开发利用研究。

* 南宁市科学研究与技术开发计划项目(20143136), 广西科学院基本科研业务经费(13YJ22SW04, 15YJ22SW04), 广西科技合作项目(15104001-5)和广西自然科学基金项目(2015GXNSFBA139022)资助。

0 引言

【研究意义】煤、石油和天然气等不可再生化石资源构成了当今世界能源和化学品工业的基石,为人类社会的发展做出了巨大贡献。随着我国工业化、城镇化进程的加快,能源的短缺和需求量增长过快的矛盾日渐突出,在当前石油资源正面临枯竭和环境压力日益沉重的形势下,将地球上最丰富的,具有可再生特性的生物质资源高效转化为燃料乙醇^[1]、甲烷^[2]以及颗粒燃料^[3]等清洁能源的开发利用已迫在眉睫。

广西是一个严重缺能的地区,近几年来,电力供应缺口徘徊在 10%~12%,且有拉大的趋势;煤炭自给率比较低,仅占 10%左右,90%依赖区外输入,年均实际缺口在 10%~15%,能源供应形势相当严峻。但同时,广西具有丰富的农林剩余物,其中桉树种植面积达到了 1.87×10^6 hm²,位居全国首位;桉树树干主要用于造纸,每年可剩余大量的桉树皮(Eucalyptus Bark, EB)、碎叶以及枝梢等。此外,广西的桑园面积约 1.86×10^3 hm²,其中桑枝(Ramulus Mori, RM)是栽桑养蚕最主要的副产物之一,广西每年产鲜伐桑枝 279 万 t。这些农林剩余物绝大部分沦为废弃物,传统的处理方法是就地露天焚烧,产生的浓烟含有有机融胶等颗粒物,可以形成 PM2.5,在短时间内加剧空气污染,形成雾霾,成为环境负担^[1]。【前人研究进展】生物质颗粒燃料是将生物质原料(主要是农作物秸秆、农产品加工剩余物及林业剩余物)经过干燥、粉碎、调配等预处理后压缩成型的燃料^[5]。成型后的颗粒燃料密度大于 1000 kg/m³,燃烧值达 3500~5000 kcal/kg,能源密度与中质烟煤相当,输送、储存方便,可替代煤炭等化石燃料应用于炊事、供暖等民用领域和锅炉燃烧、发电等工业领域^[6]。2014 年,我国生物质颗粒燃料的需求量高达 1000 万 t,而年产量不足 500 万 t,还远没有达到市场需求量。因此,利用农林剩余物生产生物质颗粒燃料具有广阔的市场需求,同时还能够为减少温室气体排放、减轻大气污染以及振兴农村经济做出重要贡献。广西的生物质颗粒燃料技术开发研究相对较晚,主要是以桉树皮、桑枝、松木屑以及杉木屑等木本生物质为原料,通过环模压制而成。由于这些木本植物中纤维素的含量较高,其韧皮部韧度强,内部木质结构坚硬,与草本类的农业剩余物相比,在物理特性、化学组成方面有着较大差别,压制成型困难^[7]。为使这些木本植物有效压缩成型,需要在高温(>70℃)、高压(>50 MPa),此外还需辅以诸如高岭土、石灰粉、菌棒废渣等粘结剂的苛刻条件下进行^[8,9]。【本研究切入点】

广西科学 2015 年 12 月 第 22 卷第 6 期

单一木本生物质的半纤维或木质素成分少,粘合性差,不易压制成型,而且容易导致成型机的主要部件损坏,缩短成型机的使用寿命^[10]。本研究以广西两种大宗的农林剩余物——桉树皮和桑枝作为主要原料,通过辅加少量的粘结剂降低成型时的压力,减小环模磨损,高效制备颗粒燃料。【拟解决的关键问题】重点考察原料颗粒尺寸、含水率、粘结剂添加量以及成型机环模孔径比等因素对颗粒成型效果的影响,优化颗粒燃料的成型工艺,为广西的大宗农林剩余物制备生物质颗粒燃料的产业提供技术支持。

1 材料与方法

1.1 材料

桉树皮(主要为桉树皮以及碎叶等)和桑枝(主要为桑树枝梢)由广西桂森生物能源技术有限公司提供。粘结剂自制,方法详见 1.3.1。生物质原料及粘结剂的纤维素、半纤维素以及木质素的含量根据参考文献[11]的方法测定,结果见表 1。

表 1 原料的纤维素、半纤维素以及木质素的含量分析

Table 1 The analysis of cellulose, hemicellulose and lignin content in raw material

Material	Cellulose (%)	Hemicellulose (%)	Lignin (%)
EB	45.56	27.02	26.43
RM	53.28	20.35	24.34
Additive	2.34	1.28	84.36

注:EB,桉树皮;RM,桑枝。

Note:EB,Eucalyptus Bark;RM,Ramulus Mori.

1.2 设备

本试验采用 YBZL620 压辊式环模生物质颗粒燃料成型机(广州耀邦重工有限公司)制样。其中,成型机主电机功率为 130 kW,喂料电机功率 1.5 kW,转速控制在 600 r/min,试验所用的环模孔径为 8 mm(图 1)。

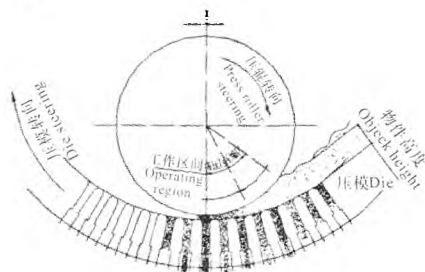


图 1 压辊式环模颗粒成型机的结构示意图

Fig.1 Structure diagram of ring die pellets forming machine

1.3 方法

1.3.1 粘结剂的制备

将蔗渣碱法造纸黑液用硫酸调节 pH 值至 3~

4,加入适量的淀粉接枝聚丙烯胺类絮凝剂,搅拌 3~5 min 后静置,让悬浮物充分沉淀,收集沉淀物,经干燥、粉碎后得主要成分为木质素的粘结剂粉末,粒度 ≤ 2 mm。

1.3.2 生物质颗粒燃料的压制成型

生物质颗粒燃料的压制成型按试验具体分为以下 3 种方式进行:

(1)采用 4 mm 孔径振动筛筛选,控制原料的颗粒大小,并通过烘干或调湿处理,控制原料的含水率在 $(20\pm 0.5)\%$,分别添加质量分数为 2%,5%,10%的粘结剂,与原料混合均匀后由传送带转入成型机,分别在 5 种环模孔长径比(3.5:1,4:1,4.5:1,5:1,5.5:1)条件下压制成型,考察环模孔长径比和粘结剂添加量对成型效率的影响。

(2)选择 5 种筛网孔径(2 mm,3 mm,4 mm,6 mm,8 mm)对原料进行粉碎,并通过烘干或调湿处理,控制原料的含水率在 $(20\pm 0.5)\%$,添加 5%的粘结剂进行均匀混合后在环模孔长径比为 4.5:1 条件下进行压制成型,考察原料颗粒度对成型效率的影响。

(3)固定原料颗粒的粒度大小为 4 mm、粘结剂添加量为 5%后,通过干燥或调湿处理,分别控制原料含水率在 $(10\pm 0.5)\%$, $(12\pm 0.5)\%$, $(16\pm 0.5)\%$, $(20\pm 0.5)\%$, $(24\pm 0.5)\%$ 5 种条件下,以环模孔长径比 4.5:1 进行压制成型,考察原料含水率对成型效率的影响。生物质原料的粉碎、过筛、干燥、物料浮配及压制成型的整套流程均在广西桂森生物能源技术有限公司进行。

1.3.3 生物质颗粒的性能测试

生产出的颗粒燃料在实验室平铺放置 2~3 h,待完全冷却后取样,按《生物质固体成型燃料试验方法》^[12]测量产品的质量。具体方法如下:

(1)成型率:用筛孔孔径为 6 mm 的振筛机筛分,小于 6 mm 的颗粒燃料属于不合格品,通过称量计算成型率。

(2)颗粒密度(Density):称取一定量的生物质固体成型燃料样品,用 GH-600CD 型固体密度测试仪(台湾 Matsuhaku)直接测量得出数值。

(3)机械耐久度(Durability):筛选颗粒完整的生物质颗粒燃料样品约 1000 g 放入转鼓试验机内,以 (40 ± 1) r/min 的速度旋转 500 转。通过在试验样品之间、样品与测试器内壁之间发生碰撞后,将已磨

损和细小的颗粒分离出来,根据剩余的样品质量计算机械耐久度。

(4)挥发分(Vad):采用 Q50 热重分析仪测定(美国 TA 公司),样品在 $(900\pm 10)^\circ\text{C}$ 隔绝空气的环境中加热 7 min,扣除水分质量损失后,按样品质量损失占样品总质量的百分数来计算。

(5)灰分(Aad):取一定质量的生物质颗粒燃料样品,通过 XL-7A 型马弗炉测定(杭州卓驰仪器有限公司),在 $(550\pm 10)^\circ\text{C}$ 有氧条件下加热后剩余物的质量占样品总质量的百分比来测定灰分。

(6)空气干燥基低位热值($Q_{\text{net,ad}}$):空气干燥基低位热值由广西科学院民用燃料及气体产品质量监督检验站测定。

2 结果与分析

2.1 环模孔长径比和粘结剂添加量分析

桉树和桑树都属于木本植物,内部结构坚硬,都需要较大的压力才能压制成型。从表 2 可以看出,当环模孔长径比为 5.5:1 时,桉树皮和桑枝都可以有效的压制成型,颗粒燃料的成型率分别为 97.6%和 95.67%;当环模孔长径比低于 4.5:1,颗粒成型率迅速下降。生物质原料中纤维素、半纤维素以及木质素这 3 组分含量的差异是影响其成型压力的最主要因素,半纤维素和木质素均属无定形非晶高聚物,没有熔点,但有软化点,在成型过程中,随着外力的增大,原料内部的温度急剧增高,此时,半纤维素和木质素会发生软化并产生机械变形和塑性流变,从而与纤维素紧密粘接,加强分子间的相互作用力,生成更致密的颗粒燃料。因此,木质素、半纤维素含量越高和纤维素含量越低,颗粒成型时所需的压力就越小;反之木质素、半纤维素含量越低和纤维素含量越高,颗粒成型时所需的压力就越大^[13]。

桉树皮与桑枝相比较,具有较少的纤维素含量和较多的半纤维素、木质素含量(表 1),结合表 2 的数据,在环模孔长径比为 4.5:1 时,桉树皮和桑枝的成型率分别为 87.37%和 78.63%,说明桉树皮比桑枝更容易压制成型。此外,从表 2 还可以清楚看出,在环模孔长径比为 4.5:1 时,在桉树皮中添加 2%和 5%的粘结剂后,其成型率由 87.37%增加至 92.97%和 94.37%,说明添加少量粘结剂就可以使生物质原料在更低的环境孔长径比条件下成型,减小环模磨损,对节约生产成本具有重要意义。

表 2 环模孔长径比和粘结剂添加量对颗粒成型效率的影响

Table 2 The influence of length-diameter ratio of ring die and weight ratio of additive on pelletizing molding ratio

Length-diameter ratio of ring die	100%EB	98% EB/2% Additive	95% EB/5% Additive	90%EB/10%Additive	100%RM	98%RM/2% Additive	95%RM/5% Additive	90%RM/10%Additive
3.5 : 1	35.34	45.64	45.93	52.11	30.21	39.62	42.89	48.12
4.0 : 1	59.58	68.86	74.52	78.75	50.24	62.38	70.55	72.27
4.5 : 1	87.37	92.97	94.37	95.96	78.63	85.59	91.26	93.35
5.0 : 1	93.02	95.58	95.69	96.82	92.65	92.25	93.26	95.80
5.5 : 1	97.60	97.13	97.27	98.24	95.67	97.64	98.20	98.52

2.2 原料颗粒度对成型效率的影响

从图 2 可以看出,在原料颗粒小于 4 mm 条件下,桉树皮和桑枝的颗粒成型率均高于 90%,说明较小的颗粒有利于压制成型。但颗粒度并非越小越好,当原料颗粒由 3 mm 减少至 2 mm,颗粒成型率出现轻微下降。因为在压制成型过程中,半纤维素和木质素可以发生软化流动,而纤维素却能够保持其硬的、细长的纤维状不变,从而形成一个以木质素、半纤维素胶结纤维素的网状骨架微结构,在一定的粒度范围内,相对较长的纤维素颗粒可以增加网络骨架的支撑力,形成韧性、强度更好的颗粒燃料^[14]。试验数据同时表明,在纤维颗粒的长度增加到一定程度后,颗粒成型效率出现急速下滑。因为当原料颗粒增大到一定量后,纤维素颗粒间的空隙加大,半纤维素和木质素已经无法很好的粘结纤维素网络骨架,成型颗粒燃料容易出现裂痕而碎裂,从而导致成型率出现急速下降。此时,曲线图上形成一个明显的拐点,该拐点可作为我们选择最佳筛网孔径的参考点。对于桉树皮和桑枝两种不同的物料,因其成分组成不同,成型的难易程度也不同,从图 2 可看出,当桉树皮的颗粒大小为 4~6 mm 时,其成型效率均大于 90%,而桑枝的成型过程对颗粒度的要求相对较高,其最佳的颗粒大小为 4 mm。

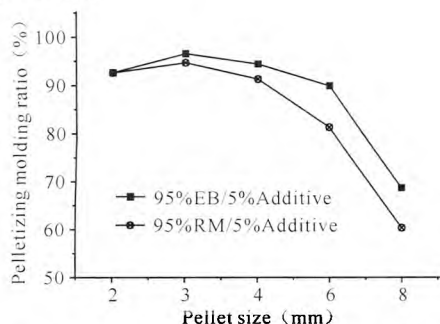


图 2 原料颗粒度对颗粒成型效率的影响

Fig. 2 The influence of pellet size on pelletizing molding ratio

2.3 原料含水率对成型效率的影响

从图 3 可以看出,原料含水率对颗粒成型效率影响

非常大,桉树皮和桑枝两种生物质原料在含水率与颗粒成型效率的关系曲线趋势几乎是一致的,只有将原料含水率控制在 16%~20%的条件下,颗粒才能有效成型。当原料含水率降低至 16%以下时,颗粒成型率呈现急速下降的趋势。如当原料的含水率在 (12±0.5)%时,桉树皮和桑枝的成型效果均不理想,颗粒成型率分别为 48.87%和 45.67%,而且在较低的含水率条件下,在生物质颗粒燃料成型过程中,颗粒成型燃料容易吸收空气中的水分,导致颗粒成型燃料膨胀变形、松弛开裂;当原料含水率高于 20%时,颗粒成型率同样呈现出下降趋势,而且在颗粒成型过程中,多余的水分会被蒸发,汽化而产生大量蒸汽,若蒸汽不能及时从成型机中排出,易导致颗粒成型燃料体积膨胀,占据空间增大,形成气堵,会造成机器卡死^[15]。

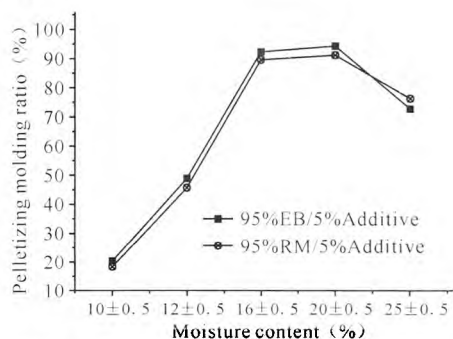


图 3 原料含水率对颗粒成型效率的影响

Fig. 3 The influence of moisture content on pelletizing molding ratio

2.4 颗粒燃料产品质量分析

颗粒燃料产品质量的优劣是评判其适用性和市场竞争力的关键因素,因而,我们在较佳的成型工艺条件下(原料含水率约 20%、颗粒大小为 4 mm,环模孔长径比为 4.5 : 1,粘结剂的添加量为 5%)制备颗粒燃料,考察生物质原料与颗粒燃料产品质量的关系,结果见表 3。

从表 3 可以看出,桉树皮和桑枝制备的颗粒燃料其密度≥1.1 g/cm³,机械耐久性≥95%,添加少量的粘结剂可以提高产品密度和机械耐久性,这主要是因

为粘结剂的主要成分是木质素,且颗粒较小,在压制成型时具有更好的流动性,可迅速填充纤维素长纤维的空隙并与之牢固结合;桉树皮和桑枝颗粒燃料的灰分均 $\leq 3\%$,低位热值均 ≥ 4100 kcal/kg,说明两者在试验条件下都可充分的燃烧,发热量达到了欧洲生物质颗粒燃料行业标准要求。颗粒燃料中纤维素的含量是影响其热值的主要因素,一般纤维素含量越高,低位热值越高^[16],桑枝颗粒燃料因为组分中含有更多的纤维素,其低位热值要稍稍高于桉树皮颗粒燃料。

表3 生物质颗粒燃料产品质量分析

Table 3 The analysis of product quality in biomass pellet fuel

Material	Density (g/cm ³)	Durability (%)	V _{ad} (%)	A _{ad} (%)	Q _{net,ad} (kcal/kg)
100%EB	1.138	96.38	80.30	1.85	4147.75
95%EB/5% Additive	1.180	97.24	80.62	2.20	4201.30
100%RM	1.194	95.96	78.43	2.32	4253.20
95%RM/5% Additive	1.208	98.25	78.69	2.42	4305.35

3 讨论

综上,环模孔长径比、原料颗粒大小、粘结剂添加量以及含水率都对生物质颗粒燃料的成型率和产品质量都有一定影响。在实际生产过程中,要充分考虑生物质原料的成型难易程度和生产成本,其中环模孔长径比决定原料的成型压力和压缩比,是影响原料成型效率的重要因素。环模孔长径比越大,原料成型过程中受到的压力越大,成型率越高,但耗电量也大幅提高,同时成型耗时长,对环模损耗大。通过添加适量的粘结剂可以使生物质原料在更低的环境孔长径比条件下成型,使生物质颗粒燃料更具市场竞争力。试验所用粘结剂的主要成分为木质素,可以充当压制成型时生物质颗粒的塑化剂,增加颗粒燃料间的粘结力,改善成型效果。此外粘结剂中还有少量的果胶、焦糖、松香酸以及不饱和脂肪酸等小分子物质,在高压条件下同样具有很好的流动性和胶黏性,可以快速填充纤维素间的空隙,增加组分间相互作用,提高颗粒的成型率。但随着粘结剂的添加量进一步增加,颗粒成型效果的改善有所趋缓,如在本研究中,在环模孔径长比为4.5:1时,添加5%的粘结剂,桉树皮和桑枝都可以有效成型,成型率大于91%。

原料的含水率是影响颗粒成型率的另一大关键因素,适量存在的水分子可以使原料颗粒间的内摩擦变小,流动性增强,从而促进原料颗粒在压力作用下

滑动而嵌合,形成坚韧的颗粒燃料^[17]。含水率过低时,水分子主要以结合水形式存在,与纤维素非结晶区、半纤维素和木质素组分的羟基、羧基形成强烈的氢键,水分子的扩散能力减弱,导致原料颗粒流动性变差,颗粒因得不到充分的延展而无法成型;含水率过高时,由于原料中较多的水分被挤出后,分布于粒子层之间,使分子间距离增大,粒子层间不能紧密贴合,而且挤压成型时产生的热量容易消耗在多余水分蒸发上,降低成型温度,使原料中的木质素难以软化,导致其粘结力下降,从而影响成型效果^[18]。在本试验条件下,原料含水率控制在16%~20%可以有效成型。

4 结论

(1)当原料的含水率为16%~20%,颗粒度为4 mm,环模孔长径比为4.5:1,粘结剂添加量为5%时,桉树皮和桑枝的成型效率均大于91%,成型机也可稳定运行。

(2)添加5%的木质素粘结剂可以使生物质原料在更低的环境孔长径比条件下成型,减小环模磨损,并可以有效提高颗粒燃料的成型率、产品密度、耐久度以及低位热值。

(3)原料的组成对颗粒燃料的成型条件和产品质量有着重要影响,原料中木质素、半纤维素含量越高,越容易压制成型;纤维素含量越高,越有利于提高颗粒燃料的低位热值。

参考文献:

- [1] 梁杰珍,陈小鹏,王琳琳,等. 蔗渣(髓)水解制备还原糖及其制备生物乙醇的研究进展[J]. 广西科学, 2015, 22(1):71-77,93.
Liang J Z, Chen X P, Wang L L, et al. Advances in production of bio-ethanol from sugarcane bagass(pith) hydrolysis[J]. Guangxi Sciences, 2015, 22(1):71-77,93.
- [2] 欧阳平凯,陈可泉,贾红华,等. 低劣生物质制备生物甲烷的研究进展与展望[J]. 广西科学, 2014, 21(1):1-5.
Ouyang P K, Chen K Q, Jia H H, et al. Progress and prospect of bio-methane production with low-valued biomass as material[J]. Guangxi Sciences, 2014, 21(1):1-5.
- [3] Nunes L J R, Matias J C O, Catalao J P S. Mixed biomass pellets for thermal energy production: A review of combustion models [J]. Applied Energy, 2014, 127(8): 135-140.
- [4] 陈明江,姜本超,陈永生,等. 生物质成型燃料是解决秸秆禁烧难题的一剂良方[J]. 中国农机化学报, 2014, 35(6):222-225.

- Chen M J, Jiang B C, Chen Y S, et al. Biomass densification briquetting fuel is a prescription to solve the puzzle of straw burning prohibition[J]. *Journal of Chinese Agricultural Mechanization*, 2014, 35(6): 222-225.
- [5] 姚宗路, 崔军, 赵立欣, 等. 瑞典生物质颗粒燃料产业发展现状与经验[J]. *可再生能源*, 2010, 28(6): 145-150.
Yao Z L, Cui J, Zhao L X, et al. Development status and experience of biomass pellet fuel in Sweden [J]. *Renewable Energy Resources*, 2010, 28(6): 145-150.
- [6] Karkania V, Fanara E, Zabaniotou A. Review of sustainable biomass pellets production: A study for agricultural residues pellets' market in Greece [J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2012, 16(3): 1426-1436.
- [7] Lu L, Tang Y, Xie J S, et al. The role of marginal agricultural land-based mulberry planting in biomass energy production[J]. *Renewable Energy*, 2009, 34(7): 1789-1794.
- [8] 屈达才. 桑枝成型燃料的制造方法: 中国, 101928621A [P]. 2010-08-31.
Qu D C. Production Method of Ramulus Morias Biomass Pellet Fuel: China, 101928621A [P]. 2010-08-31.
- [9] 黎演明, 黄志民, 龙思宇, 等. 添加适量菌棒废渣提高桑枝颗粒燃料成型率及改善燃烧性能[J]. *农业工程学报*, 2015, 31(19): 216-221.
Li Y M, Huang Z M, Long S Y, et al. Optimum mushroom planted residual as briquetting binder in ramulus mori pellet fuel improving their modeling ratio and combustion properties[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2015, 31(19): 216-221.
- [10] 肖宏儒, 梅松, 宋志禹, 等. 生物质成型燃料加工关键技术及装备研究[J]. *中国农机化学报*, 2014, 35(6): 217-221.
Xiao H R, Mei S, Song Z Y, et al. Research on equipment and key techniques of biomass briquette processing[J]. *Journal of Chinese Agricultural Mechanization*, 2014, 35(6): 217-221.
- [11] 田维亮, 葛振红, 李继兴. 棉子壳中半纤维素、纤维素和木质素含量的测定[J]. *中国棉花*, 2013, 40(7): 24-25, 27.
Tian W L, Ge Z H, Li J X. Determination of hemicellulose, cellulose and lignin contents in five samples of cotton seed shell [J]. *China Cotton*, 2013, 40(7): 24-25, 27.
- [12] 中华人民共和国农业部. NY/T1881—2010 生物质固体成型燃料试验方法[S]. 北京: 中国农业出版社, 2010.
Ministry of Agriculture of the People's Republic of China. NY/T1881—2010 Test Methods of Biomass Pellet Fuel [S]. Beijing: China Agriculture Press, 2010.
- [13] 何晓峰, 雷廷宙, 李在峰, 等. 生物质颗粒燃料冷成型技术试验研究[J]. *太阳能学报*, 2006, 27(9): 937-941.
He X F, Lei T Z, Li Z F, et al. Research of biomass fuel cold compression molding technical[J]. *Acta Energiæ Solaris Sinica*, 2006, 27(9): 937-941.
- [14] Stelte W G, Holm J K, Sanadi A R. Fuel pellets from biomass: The importance of the pelletizing pressure and its dependency on the processing conditions [J]. *Fuel*, 2011, 90(11): 3285-3290.
- [15] 黄逢龙, 刘大椿, 邓欲, 等. 林业剩余物颗粒燃料成型工艺[J]. *林业科技开发*, 2014, 28(3): 115-118.
Huang F L, Liu D C, Deng Y, et al. Pelletion process of forest residues as biofuel[J]. *China Forestry Science and Technology*, 2014, 28(3): 115-118.
- [16] Kong L J, Xiong Y, Tian S H. Intertwining action of additional fiber in preparation of waste sawdust for biofuel pellets [J]. *Biomass and Bioenergy*, 2013, 59: 151-157.
- [17] Samuelsson R, Larsson, S H, Thyrel M, et al. Moisture content and storage time influence the binding mechanisms in biofuel wood pellets [J]. *Applied Energy*, 2012, 99: 109-115.
- [18] Lestander T A, Finell M, Samuelsson R, et al. Industrial scale biofuel pellet production from blends of unbarked softwood and hardwood stems—The effects of raw material composition and moisture content on pellet quality[J]. *Fuel Processing Technology*, 2012, 95: 73-77.

(责任编辑: 陆 雁)