

DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2012.12.020

生物质原料持续供应条件下理化特性研究^{*}

霍丽丽 田宜水 赵立欣 姚宗路 孟海波
(农业部规划设计研究院, 北京 100125)

【摘要】 以北京市大兴某生物质固体成型燃料厂为例,研究了不同季节供应的玉米秸秆、花生壳、木屑3种生物质原料物理和热化学特性的变化规律。结果表明,木屑的全水分质量分数较高,超过40%,花生壳和玉米秸秆为10%左右,不同种类原料的堆积密度、流动特性、发热量、灰分、挥发分等特性有一定差异。木屑的堆积密度较大,挥发分含量较高,灰分含量较低。木屑和花生壳的干燥基发热量较玉米秸秆高,但由于木屑的水分过高导致其收到基发热量较低。不同季节的同类原料理化特性也有差异,特别是水分、发热量、灰分差异显著。全水分含量随当地气候条件而变化,6月份之后,玉米秸秆、花生壳和木屑的干燥基发热量分别降低约7%、3.5%和5%。因此,在生物质原料储藏、运输、压缩成型等设备的设计过程中,应充分考虑不同种类原料堆积密度、流动特性等物理特性的差异,而生物质原料的燃烧过程,不仅涉及不同种类原料的差异,还应考虑不同季节造成的影响。

关键词: 生物质 理化特性 持续供应 能源
中图分类号: TK6; S216.2 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2012)12-0107-07

Physicochemical Properties of Biomass Resources for Sustainable Supply

Huo Lili Tian Yishui Zhao Lixin Yao Zonglu Meng Haibo
(Chinese Academy of Agricultural Engineering, Beijing 100125, China)

Abstract

Change regularity of physicochemical properties of corn straw, peanut shell and sawdust which are supplied from different seasons was studied based on a case study of biomass solid fuel plant in Daxing district of Beijing. The results showed that total moisture of sawdust was higher, more than 40%. Total moisture of corn straw and peanut shell was about 10%. The bulk density, flow characteristics, calorific value, ash, volatile matter of three types of raw materials were varies. Sawdust had relatively high bulk density and volatile matter but lower ash. Peanut shell and sawdust dry basis calorific value was higher than corn straw high. However, as received basis calorific value has lower. Physicochemical properties of the same materials of different season were different; especially total moisture varied with the local climatic conditions. After June, dry basis calorific value of corn straw, peanut shell and sawdust were reduced about 7%, 3.5% and 5%. Therefore, difference of physicochemical properties of several of raw materials such as bulk density, flow characteristics should be fully considered during related equipments design process of storage, transport, and compression forming of raw materials. Furthermore for the combustibile characteristics of raw materials, not only difference of physicochemical properties should be considered, but also different seasons.

Key words Biomass, Physicochemical properties, Sustainable supply, Energy

收稿日期: 2012-05-02 修回日期: 2012-06-17
^{*} 科技部国际科技合作项目(2011DFAG0600)
作者简介: 霍丽丽, 博士生, 主要从事机械设计与制造研究, E-mail: huolili666@126.com
通讯作者: 孟海波, 高级工程师, 主要从事生物质资源开发利用研究, E-mail: newmhb7209@163.com

引言

农作物秸秆、农产品加工剩余物和林业剩余物等生物质原料作为清洁的可再生能源,具有资源丰富等优点,在直燃发电、压缩成生物质成型燃料替代煤等方面被广泛应用,开发和利用的潜力巨大^[1-2]。但生物质资源收集存在着季节性问题,与工业生产的连续性相矛盾。因此,为满足能源化利用,需要了解不同季节供应的生物质资源理化特性的变化规律,建立合理的生物质原料的储存供应体系和设计合理的输送、制粒、燃烧等工序的成套设备。

周捍东等对林业剩余物的堆积特性有一定研究^[3-5]。田宜水等对不同地区粒度为 5~30 mm 切碎原料进行理化特性研究^[6]。孙占峰等对整根秸秆的压缩、弯曲和剪切等力学特性进行了分析^[7-8]。周晶等对秸秆资源收集季节性和能源供应持续性进行分析总结,得出北方地区的秸秆原料只有 3 个月的充分供应期,其余月份均出现一定程度的短缺^[9]。张国梁等首先提出生物质成型燃料生产与应用中存在的问题是秸秆难以持续供应^[10]。孙静春等提出电厂与专业化的收储企业进行纵向联盟,以应对原料的充分供应^[11]。以上研究者对秸秆供应和部分理化特性进行了一定研究,但是仍存在如因不同季节供应的生物质原料在储存过程中理化特性改变,从而影响其高效利用等问题。

本研究分别选择玉米秸秆、花生壳和木屑 3 类生物质原料作为研究对象,研究不同季节供应的生物质原料理化特性变化规律,为生物质原料的储存、供应与能源化利用提供参数依据。

1 材料与方 法

1.1 试验仪器

9QS-16.0 型铡草机、101-1A 型电热鼓风干燥箱、PL2002/01 型电子天平(精度 0.01 g)、BSA223S-CW 型分析天平(精度 0.000 1 g)、HLP 型粉碎机(筛孔径 10 mm)、GZS-1 型自动标准振筛机、样品分析筛(筛孔尺寸分别为 0.45、0.6、1、3、3.3、6、10、16、32、45、63、80 mm)、堆积筒(容积为 5 L)、堆积角测量仪(自制)、HZJ 型振动平台、外摩擦因数测定仪(自制)、GJ-2 型密封式化验制样粉碎机、ZDHW-5 型微机全自动量热仪、XL-1 型高温炉、干燥器、集料框、角度尺、试验用钢板(300 mm×1 200 mm×3 mm)、橡胶平带(300 mm×1 200 mm×3 mm)、ZJ-2 型等应变直剪仪、游标卡尺、钢板尺、百分表、角度尺、计时器、托盘等。

1.2 试验方法

1.2.1 试验原料及制样

以北京市大兴某生物质固体成型燃料厂为例,分别选取玉米秸秆、花生壳、木屑为主要研究对象。取样在该厂露天原料堆放场,取样为厂区内的收到基,按照 NY/T 1879—2010 标准方法取样,每月取样 1 次,每次取 5 kg。该厂收集的玉米秸秆主要来自河北省固安,收获期为 10 月初,秸秆晾晒后,农户自行收集,送到该成型燃料厂,露天堆垛储藏。花生壳 11 月左右送到成型燃料厂,露天堆积储藏。木屑常年供应,木材加工厂购买,随时进厂,露天堆积储藏。

采集样品进行分样制备。将采集的玉米秸秆用铡草机粗粉碎,取 1 kg 放入振动筛,振动 30 s 后,采用不同孔径的试验筛进行筛选,称量,并对原料粒度分布进行分析,其余原料装入密封袋待用。花生壳和木屑不用粉碎,取 1 kg 样品直接放入振动筛筛分,按上述步骤进行,其余密封保存。3 种原料粒度分布如图 1 所示。

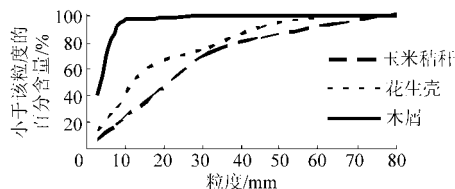


图 1 原料粒度测定分布

Fig. 1 Particle size of different biomass material

1.2.2 试验设计

以自然晾晒的玉米秸秆、花生壳、木屑为原料,进行全水分、堆积角、堆积密度、内外摩擦因数等物理特性测定以及挥发分、灰分、发热量等热化学特性的测定^[12],各指标测试参照标准如表 1 所示。玉米秸秆和花生壳原料一般在 10 月末开始收集和储存,可以持续到第二年 1 月份,上述 2 种原料在这 3 个月份基本可以满足供应,其他月份需要在厂区储存部分原料,木屑可随时供应,试验选择测定全年 1~12 月份,每月进行 1 次。

2 结果与分析

2.1 物理特性

2.1.1 全水分

全水分含量测定结果如图 2 所示。由图可见,玉米秸秆和花生壳全水分含量均在 10% 左右,木屑在 40% 左右,全水分含量较大,这是由于木质材料自身的全水分含量较高,木屑主要来源于板材加工的副产品,周年持续供应,晾晒时间有限,并且木屑堆积空隙小,空气无法流通,短时间内无法完全使水

表 1 原料各指标测定方法

Tab.1 Determination method of various indicators	
指标	测试依据
全水分含量	NY/T 1881.2—2010 生物质固体成型燃料试验方法第 2 部分:全水分
堆积角	JB/T 9014.7—1999 连续输送设备散粒物料堆积角的测定
堆积密度	NY/T 1881.6—2010 生物质固体成型燃料试验方法第 6 部分:堆积密度
外摩擦因数	JB/T 9014.9—1999 连续输送设备散装物料外摩擦系数的测定
内摩擦因数	JB/T 9014.8—1999 连续输送设备散粒物料抗剪强度的测定
流动特性	Carr 流动性指数法
发热量	NY/T 12—1985 生物质燃料发热量测试方法
一般分析样品水分含量	NY/T 1881.1—2010 生物质固体成型燃料试验方法第 1 部分:一般分析样品水分
挥发分含量	NY/T 1881.4—2010 生物质固体成型燃料试验方法第 4 部分:挥发分
灰分含量	NY/T 1881.5—2010 生物质固体成型燃料试验方法第 5 部分:灰分

分与外界达到平衡,因此全水分含量较高。三大类原料的全水分含量均随气候变化而变化,该地区春季干旱多风,原料随季节变化全水分含量降低。夏季多雨,且降水集中,5~8 月份秸秆原料的全水分含量随季节变化略有升高,特别是 8 月份由于取样地点该月降水较多,原料全水分含量升高,玉米秸秆和花生壳的全水分含量增加到 15% 左右,而木屑的全水分含量可达 50% 以上。秋季降雨量偏少,原料的全水分含量略有下降。冬季气温低,全水分含量蒸发相对较慢,原料的全水分含量高,特别是木屑,全水分含量超过了 60%,而玉米秸秆和花生壳 11 月份为收集期,全水分含量高,约为 30%,晾晒 1~2 个月可下降到 10% 左右,基本达到水分平衡。

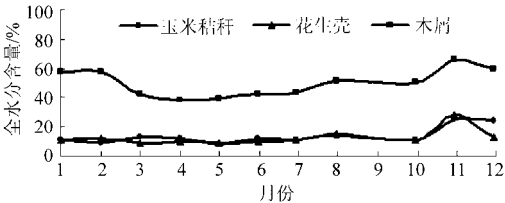


图 2 原料全水分测定结果

Fig.2 Total moisture of different biomass material

全水分是生物质原料能源化利用关注的重要指标之一。原料的全水分对生物质成型燃料的成型影响显著,生物质原料的最佳成型全水分含量在 10%~25% 之间,农作物秸秆和农业剩余物的全水分含量基本满足成型要求,而林业剩余物的自然堆积下的全水分含量远远高于成型水分要求。因此,设计成

型配套设备时,木屑成型应增加烘干设备,而玉米秸秆和花生壳自然晾晒后,基本可以满足成型要求。

2.1.2 堆积密度

堆积密度为原料储存设施和输送设备的设计提供基础数据。以收到基为基准,不同原料的自然堆积密度如图 3 所示。木屑的自然堆积密度最大,均在 150 kg/m³ 以上,花生壳次之,100 kg/m³ 左右,玉米秸秆最小,小于 50 kg/m³。不同原料的振实堆积密度与自然堆积密度规律一致,木屑的振实堆积密度最大,为 210~360 kg/m³,其次为花生壳,为 100~150 kg/m³,玉米秸秆最小,为 40~70 kg/m³。

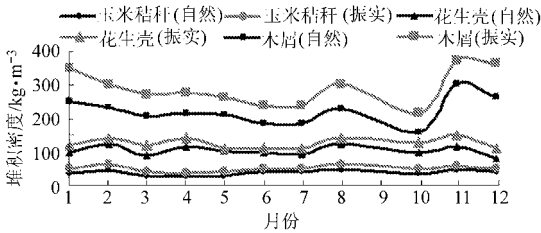


图 3 原料堆积密度测定结果

Fig.3 Bulk density of different biomass material

不同月份原料的自然和振实堆积密度略有波动,3 类原料的堆积密度变化受全水分含量变化的影响。木屑在 3~7 月份的堆积密度变化不显著,但 8 月至次年 2 月份差异较大,8 月份堆积密度升高,主要受天气变化影响,该月份降雨量较大,原料的全水分含量高,使得原料的堆积密度高,木屑在 1、2、11、12 月份的堆积密度较高,主要受气候变化影响,环境温度降低,水分蒸发愈来愈慢,木屑中的水分含量基本未减少,因此堆积密度较高。玉米秸秆和花生壳的堆积密度变化规律与木屑类似,均与全水分含量随月份的变化规律一致。

原料的水分和粒度都对堆积密度有影响。原料的全水分含量愈高,堆积密度愈大。同类秸秆原料粒度愈小,粒子间空隙愈小,堆积密度愈大。堆积相同质量的不同种类原料,玉米秸秆、花生壳所占体积分别是木屑的 4 倍和 2 倍,玉米秸秆松散,对于储存和运输等增加了占地面积与空间,成本也相应增加,据资料显示,原料投入一般占生物质发电项目总投资成本的 70% 以上,而收集和运输的成本是原料成本的重要组成部分,玉米秸秆的堆积密度小,储存占地面积大,且收集具有季节性,因此,秸秆收获后,为了运输和储存的方便,需要进行预压、通风仓干燥后才存储。

2.1.3 摩擦因数

摩擦因数分为外摩擦因数和内摩擦因数,外摩擦因数又分为最大静摩擦因数和滑动摩擦因数。外摩擦因数可为输送、压缩等机具设计提供重要的数

值依据。木屑与外界材料的外摩擦因数最大,花生壳和玉米秸秆摩擦因数略小,各原料摩擦因数范围见表2。不同种类原料与橡胶材质的摩擦因数均大于与金属材料的摩擦因数,最大静摩擦因数大于滑动摩擦因数。不同月份的各原料最大静摩擦因数和滑动摩擦因数均无明显变化规律,如图4所示。

表 2 各原料摩擦因数测定值

Tab.2 Friction coefficient of biomass material

原料种类	玉米秸秆	花生壳	木屑
与金属的最大静摩擦因数	[0.40,0.62]	[0.40,0.63]	[0.62,0.73]
与金属的滑动摩擦因数	[0.37,0.46]	[0.36,0.50]	[0.50,0.58]
与橡胶的最大静摩擦因数	[0.48,0.68]	[0.55,0.74]	[0.67,0.79]
与橡胶的滑动摩擦因数	[0.40,0.53]	[0.40,0.50]	[0.52,0.62]
内摩擦因数	[0.69,0.84]	[0.72,0.92]	[0.70,0.76]

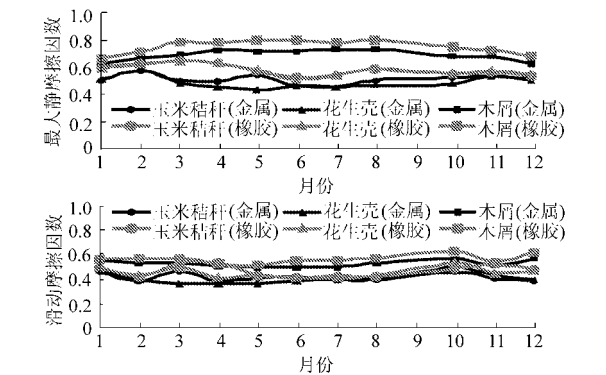


图 4 原料外摩擦因数测定结果

Fig.4 Friction coefficient of different biomass material

内摩擦因数反映原料粒子层与层之间的流动特性。各原料的内摩擦因数均大于各原料的外摩擦因数,如图5所示。不同种类原料的内摩擦因数无明显规律,在0.6~1.0之间。不同月份木屑的内摩擦因数基本无变化。原料密度大意味着原料间孔隙小,接触紧密,原始内聚力较大,因此密度高的原料,抗剪强度大,内摩擦因数大。木屑的粒度小,堆积密度高,内摩擦因数应该较其他原料高,但由于木屑的含水量很高,影响了内摩擦因数。原料的含水量增加时,抗剪强度降低,内摩擦因数变小。因此,内摩擦因数受原料粒度、原料密度、全水分等的共同影响。

2.1.4 流动特性

选用堆积角评价流动特性,各类生物质原料的静态堆积角在35°~52°之间,属于流动性较差的原料,如图6所示。堆积角是原料仓储设备设计的重要参考指标,反映原料粒子与粒子间的相互作用。在设计仓储设备时,仓壁的倾角应至少比堆积角大

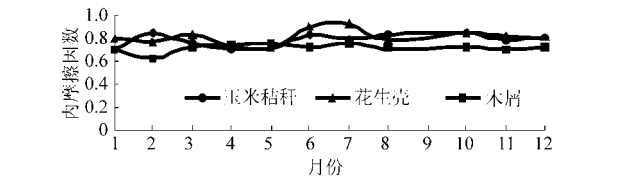


图 5 原料内摩擦因数测定结果

Fig.5 Internal friction coefficient of different biomass material

2°~3°^[13]。木屑的静态堆积角最小为38°左右,花生壳其次,约为41°,玉米秸秆的静态堆积角较大,约为43°。原因是粒子愈小愈易流动,粒子愈接近于球形,其堆积角愈小,木屑粒子最小,而且形状最接近球形,流动性好。花生壳、玉米秸秆粉碎后为不规则的片、块状,不易流动。各类原料的动态堆积角在20°~38°之间,木屑的动态堆积角最大,花生壳和玉米秸秆差异不大。按允许误差5%测算,不同月份同种原料的静态、动态堆积角数值均无显著性差异,这说明不同季节对原料的堆积角影响不大,在仓储设备设计中可不考虑季节因素的影响,需要考虑的是原料的种类差异。原料的全水分、粒度直接影响堆积角的变化^[12]。木屑的静态堆积角较小,而动态堆积角较大,原因是木屑粒度均小于10mm,且形状规则,自然堆积下容易流动,但木屑原料的水分含量高,颗粒间运动的粘聚力增大,导致振动时粒子不易流动,因此动态堆积角会随着原料全水分的增加而增大。

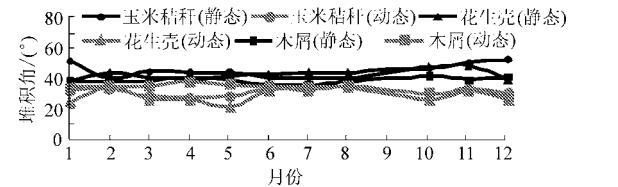


图 6 原料堆积角测定结果

Fig.6 Accumulated angle of different biomass materia

选用 Carr 指数法描述原料的流动特性,采用堆积角(静态)、压缩率、板勺角、均匀度4个指标来评价原料的流动性能。堆积角愈小,愈易流动;压缩率愈大,流动性愈差;板勺角愈小,流动性愈好;原料粒度愈均匀,流动性愈好。流动性指数满分为100分,4项指标分别为25分。流动性指数从0~100分7个等级,由低到高表示原料流动性的好坏^[14],见表3。由流动性指数可见,如图7所示,花生壳和木屑的流动特性为一般,玉米秸秆的流动特性差。设计原料输送和仓储装备时,应考虑不同种类生物质原料流动性的差异。1~9月份,3类原料的流动特性具有一定差异,花生壳和木屑的流动特性相对较好,玉米秸秆的流动性最差,主要原因是玉米秸秆原料的均匀度最差,且极易压缩,压缩率较

高。10~12 月份 3 类原料的流动特性差异缩小,流动特性均一般,造成玉米秸秆流动性增加的原因主要为原料的全水分含量高,使自然堆积密度增大,比振实堆积密度的数值高,进而压缩率降低,流动性指数评价数值变大。

表 3 流动性评价指标
Tab.3 Flow property evaluation

序号	流动性指数	对流动性评价
1	90 ~ 100	最好
2	80 ~ 89	好
3	70 ~ 79	好
4	60 ~ 69	一般
5	40 ~ 59	差
6	20 ~ 39	差
7	0 ~ 19	最差

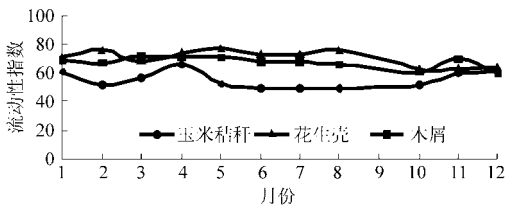


图 7 原料流动性指数测定结果

Fig. 7 Fluidity index of different biomass materials

2.2 化学特性

主要研究生物质原料的发热量和工业分析。发热量分别以收到基和干燥基为基准,工业分析以干燥基数值为基准。

2.2.1 发热量

发热量是生物质原料能源化利用的重要评价指标之一。各原料干燥基发热量见图 8a,木屑本身的发热量较高在 15 000~24 200 kJ/kg 之间,仅 5 月份木屑的发热量较低,可能是因为该批次的原料质量稍差,含杂质过多造成的。其次为花生壳,发热量在 19 300~23 200 kJ/kg 之间,玉米秸秆的发热量略低,在 16 700~21 900 kJ/kg 之间。玉米秸秆和花生壳都是 11 月份开始收集,储存一年,11 月份新收集的玉米秸秆和花生壳的发热量较高,到了 12 月份的两种原料的发热量仍然略有增加,这可能是由于植物自身的生理变化,而在储存期的 1~10 月份,发热量总体趋势是下降的,1~5 月份发热量变化不显著,而到 6 月份以后,下降趋势非常明显,玉米秸秆的发热量从 18 000 kJ/kg 降到 16 700 kJ/kg,降低了 1 300 kJ/kg,花生壳的发热量从 20 000 kJ/kg 降到 19 300 kJ/kg,降低了 700 kJ/kg。而木屑是不定期进厂,除了受到批次的影响外,木屑的发热量可能与天气的温度变化相关,春夏季的 4~8 月份的发热量较

低,均低于 20 000 kJ/kg,秋冬季的发热量较高,均高于 20 000 kJ/kg,且从秋季到冬季,发热量有逐渐升高的趋势。

收到基发热量中,除了原料自身的生理变化影响发热量外,原料的全水分直接影响收到基发热量。花生壳的收到基发热量最高,玉米秸秆其次,而木屑却极低,原因是自然风干的木屑仍有 40% 以上全水分。玉米秸秆原料的收到基发热量在 15 000~16 400 kJ/kg 之间,花生壳在 15 300~20 300 kJ/kg 之间,木屑在 9 100~12 300 kJ/kg 之间,如图 8a 所示。不同月份的玉米秸秆和花生壳的收到基发热量 11 月份新收集的原料比较低,主要是受原料中的全水分影响,随着水分散失,发热量逐渐升高,12 月份基本达到最高,次年的 1~5 月份趋于平稳,到了 6 月份,受到植物自身的生理变化影响,发热量迅速下降,到了 10 月份,发热量降低超过 10%。木屑的收到基发热量与原料所含全水分关系最为密切,水分高,发热量低。

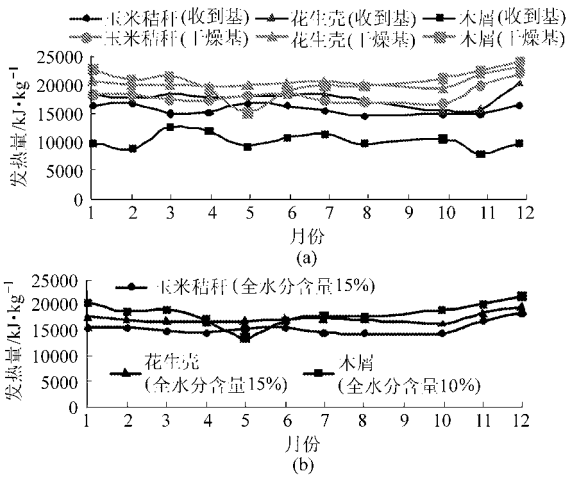


图 8 原料发热量测定结果

Fig. 8 Calorific value of different biomass materials
(a) 收到基和干燥基发热量 (b) 折合水分后发热量

生产生物质固体成型燃料过程中,玉米秸秆和花生壳原料的最佳成型水分约为 15%,木屑的最佳成型水分约为 10% 左右。按照其最佳成型的水分折合后比较 3 种原料的发热量如图 8b 所示,可见,除 5 月份木屑热值较低外,三者折合后的发热量范围在 14 000~21 800 kJ/kg 之间,木屑的发热量较高,花生壳略低,玉米秸秆最低。玉米秸秆和花生壳在 11、12 月份发热量较高,随着时间推移,发热量逐渐降低,特别是到次年 6 月份以后,降低趋势明显,玉米秸秆约损失 1 500 kJ/kg 热量,花生壳约损失 700 kJ/kg 热量。木屑在 10 月份至次年 3 月份比在 4~9 月份的发热量高 1 000~2 000 kJ/kg 热量。在能源化利用中,花生壳和木屑优势比玉米秸秆明显,

且不受随季节变化理化特性变化的限制,但二者往往会受到可收集的资源量、供应量和供应地区等的限制。

2.2.2 工业分析

工业分析一般包括样品水分、灰分、挥发分,为去除水分的干扰,研究以干燥基为基准。由图 9 所示,不同原料的挥发分中,玉米秸秆最小,其次为花生壳,两类原料的挥发分均在 80% 左右,而木屑的挥发分质量分数最高,均在 80% 以上。玉米秸秆和花生壳的灰分质量分数较高,平均为 10% 和 7% 左右,木屑的灰分质量分数最少,平均为 2%。

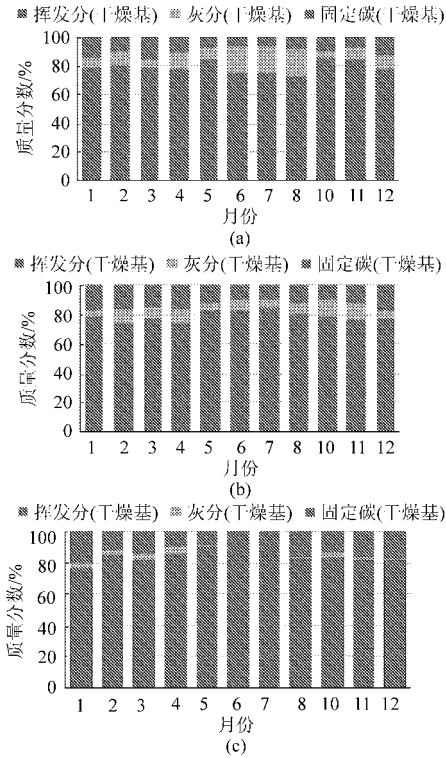


图 9 原料工业分析测定结果

Fig.9 Proximate analysis of different biomass materials

(a) 玉米秸秆 (b) 花生壳 (c) 木屑

3 类原料的灰分、挥发分、固定碳随季节不同都有一定变化,特别是夏季变化较大。玉米秸秆夏季挥发分含量急剧降低,灰分含量增高,固定碳含量减小,玉米秸秆的灰分和固定碳含量变化可能是植物自身的生理特性发生变化,导致有机物丧失。花生

壳的挥发分含量夏季略高,而灰分和固定碳含量在夏季反而减少。木屑的挥发分含量 5~8 月份较高,灰分含量 5~8 月份略低。

玉米秸秆的灰分含量从 4 月份起,随季节变化逐渐增加,尤其是夏季灰分更高,木屑和花生壳的灰分反而略有降低。因此,生物质原料供应中,应考虑原料的自身理化特性变化,玉米秸秆的适宜供应期从 11 月份到次年的 3 月份,其余时间可选取花生壳、木屑等其他不受季节影响的原料替代。花生壳和木屑的储存期相对较长,可在本年内随时利用。因此,该生物质成型燃料厂中的原料应考虑收集不同种类原料交叉利用,冬季主要以丰富的秸秆类原料为主,春季用花生壳,其他季节在其他两类原料短缺时,可以随时用木屑原料补充。

3 结论

(1)不同季节的原料,全水分含量随当地气候条件而变化,木屑全水分含量超过 40%,花生壳和玉米秸秆全水分含量为 10% 左右;木屑的堆积密度较大,挥发分含量较高,灰分含量较低。木屑和花生壳的干燥基发热量较玉米秸秆高,但由于木屑的水分过高导致其收到基发热量较低,6 月份之后,玉米秸秆、花生壳和木屑的干燥基发热量分别降低约 7%、3.5% 和 5%。

(2)农作物秸秆具有明显的季节性,足量储存方能满足规模化生产的需要,秸秆原料的理化特性随季节发生变化,夏季变化较明显,导致燃烧灰分增加,发热量降低,二者产生了矛盾,为保证原料的连续供应,可采用农产品剩余物(如花生壳等)或林业剩余物(如木屑等)补充供应。

(3)本研究仅选择了 3 种原料进行分析,尚不足以对农作物秸秆、农产品加工剩余物和林业剩余物等三大类生物质原料的供应系统进行综合评估,建议尽快建立原料数据库系统,对不同区域各类生物质资源的原料特性进行测试,建立原料供应潜力综合评估体系,为满足大规模工业化生产的原料供应需求提供基础依据。

参 考 文 献

1 田宜水,赵立欣,孙丽英,等. 农业生物质能资源分析与评价[J]. 中国工程科学,2011,13(2):24~28.
Tian Yishui, Zhao Lixin, Sun Liying, et al. Analysis and evaluation on agricultural biomass resources[J]. Engineering Sciences, 2011, 13(2): 24~28. (in Chinese)

2 杨中平,郭康权,朱新华,等. 秸秆资源工业化利用产业及模式[J]. 农业工程学报,2011,17(1):27~31.
Yang Zhongping, Guo Kangquan, Zhu Xinhua, et al. Straw resources utilizing industry and pattern [J]. Transactions of the CSAE, 2011, 17(1): 27~31. (in Chinese)

3 Ragland K W, Aerts D J, Baker A J. Properties of wood for combustion analysis[J]. Bioresource Technology, 1991, 37(2):

- 161 ~ 168.
- 4 Haykm-Acma H. Combustion characteristics of different biomass materials[J]. *Energy Convers Manage*, 2003, 44(1): 155 ~ 162.
- 5 周捍东,徐长妍,丁沪闽. 木材散碎物料基本堆积特性的研究[J]. *木材加工机械*,2002,13(6):7 ~ 17.
Zhou Handong, Xu Changyan, Ding Humin. Studies on the basic characteristics of wooden bulk materials [J]. *Wood Processing Machinery*, 2002,13(6): 7 ~ 17. (in Chinese)
- 6 田宜水,姚宗路,欧阳双平,等. 切碎农作物秸秆理化特性试验[J]. *农业机械学报*,2011,42(9):124 ~ 128.
Tian Yishui, Yao Zonglu, Ouyang Shuangping, et al. Physical and chemical characterization of biomass crushed straw [J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2011, 42(9): 124 ~ 128. (in Chinese)
- 7 孙占峰,蒋恩臣. 稻草秸秆力学特性研究[J]. *东北农业大学学报*,2007,38(5):660 ~ 664.
Sun Zhanfeng, Jiang Enchen. Study on mechanical properties of rice straw [J]. *Journal of Northeast Agricultural University*, 2007,38(5):660 ~ 664. (in Chinese)
- 8 孟海波,韩鲁佳. 秸秆物料的特性及其加工利用研究现状与应用前景[J]. *中国农业大学学报*,2003,8(6): 38 ~ 41.
Meng Haibo, Han Lujia. Analysis of application and prospects and study status of the processing properties of straw materials [J]. *Journal of China Agricultural University*, 2003, 8(6): 38 ~ 41. (in Chinese)
- 9 周晶,吴海涛,丁士军,等. 秸秆资源收获季节性及其能源供应持续性分析[J]. *资源科学*,2011,33(8):1 537 ~ 1 545.
Zhou Jing, Wu Haitao, Ding Shijun, et al. Analysis of seasonal variation in crop residue harvest and sustainability of its energy supply[J]. *Resources Science*,2011,33(8):1 537 ~ 1 545. (in Chinese)
- 10 张国梁,张振涛,孙照斌,等. 生物质成型燃料生产与应用的问题分析[J]. *农机化研究*,2011,33(8):177 ~ 183.
Zhang Guoliang, Zhang Zhentao, Sun Zhaobin, et al. Analysis of problems of biomass briquette production and application [J]. *Journal of Agricultural Mechanization Research*, 2011,33(8): 177 ~ 183. (in Chinese)
- 11 孙静春,李艳光,黄晓菲. 秸秆发电燃料市场的纵向联盟博弈[J]. *西安交通大学学报:社会科学版*,2009,29(4):25 ~ 29.
Sun Jingchun, Li Yanguang, Huang Xiaofei. Vertical coalitional game in the fuel market of generating electricity by straw [J]. *Journal of Xi'an Jiaotong University: Social Sciences*, 2009,29(4):25 ~ 29. (in Chinese)
- 12 霍丽丽,田宜水,赵立欣,等. 农作物秸秆原料物理特性及测试方法研究[J]. *可再生能源*, 2011,29(6):86 ~ 92.
Huo Lili, Tian Yishui, Zhao Lixin, et al. Research on physical property of crop straw and test methods[J]. *Renewable Energy*, 2011,29(6):86 ~ 92. (in Chinese)
- 13 陈长冰,梁醒培. 散体物料物理特性对筒仓动态侧压力的影响[J]. *粮食与饲料工业*, 2008(11):13 ~ 17.
Chen Changbing, Liang Xingpei. Effect of bulk material physical properties on dynamic lateral pressure of silo wall[J]. *Cereal and Feed Industry*, 2008(11):13 ~ 17. (in Chinese)
- 14 张鹏. 卡尔指数法在评价煤粉粉体特征中的应用[J]. *中国粉体技术*,2000,6(5):33 ~ 36.
Zhang Peng. Application of carr index method in comprehensive evaluating properties of coal power [J]. *China Power Science and Technology*, 2000, 6(5):33 ~ 36. (in Chinese)

(上接第 43 页)

- 11 黎波,严骏,曾拥华,等. 挖掘机工作装置运动学建模与分析[J]. *机械设计*,2011, 28(10): 7 ~ 10.
Li Bo, Yan Jun, Zeng Yonghua, et al. Kinematics modeling and analysis of excavator working device [J]. *Journal of Machine Design*, 2011, 28(10): 7 ~ 10. (in Chinese)
- 12 杨军宏,尹自强,李圣怡. 阀控非对称缸的非线性建模及其反馈线性化[J]. *机械工程学报*,2006, 42(5): 203 ~ 207.
Yang Junhong, Yin Ziqiang, Li Shengyi. Nonlinear modeling and feedback linearization of valve-controlled asymmetrical cylinder[J]. *Chinese Journal of Mechanical Engineering*, 2006, 42(5):203 ~ 207. (in Chinese)
- 13 白寒,王庆九,徐振,等. 阀控非对称缸系统多级滑膜鲁棒自适应控制[J]. *农业机械学报*,2009, 40(10): 193 ~ 198.
Bai Han, Wang Qingjiu, Xu Zhen, et al. Multiple sliding mode robust adaptive control for valve controlled asymmetric cylinder system[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2009, 40(10): 193 ~ 198. (in Chinese)
- 14 吕云嵩. 阀控非对称缸频域建模[J]. *机械工程学报*, 2007, 43(9): 122 ~ 126.
Lü Yunsong. Modeling in frequency domain for valve controlled asymmetric hydraulic cylinders [J]. *Chinese Journal of Mechanical Engineering*, 2007, 43(9): 122 ~ 126. (in Chinese)
- 15 Li Yun, Kiam Heong Ang, Chong G C Y. PID control system analysis and design [J]. *Control System, IEEE*, 2006, 26(1): 32 ~ 41.
- 16 Gao Yingjie, Jin Yanchao, Zhang Qin. Motion planning based coordinated control for hydraulic excavators[J]. *Chinese Journal of Mechanical Engineering*, 2009, 22(1): 97 ~ 101.