doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2013.08.025

生物质颗粒燃料短期储藏特性研究*

田宜水　张中波　赵立欣　姚宗路　孟海波
(农业部规划设计研究院农业部农业废弃物能源化利用重点实验室, 北京 100125)

摘要: 中国不同地区气候不同,温湿度差异较大,生物质颗粒燃料在储藏过程中,会引起颗粒燃料的特性发生变化,从而对燃料的应用产生影响。针对玉米秸秆颗粒和木质颗粒两种燃料,采用密封和露天 2 种储藏形式,利用高低温湿热试验箱模拟不同温湿度条件,开展储藏试验。结果表明,生物质颗粒燃料在储藏过程中,影响颗粒燃料全水分的主要因素是温度、湿度和储藏方式;湿度大于 70%,玉米秸秆颗粒燃料会出现长毛、发霉现象;木质颗粒燃料在高温、高湿条件时,会出现裂缝及发霉现象。

关键词: 生物质　颗粒燃料　储藏　温度　湿度
中图分类号: TK6　　**文献标识码**: A　　**文章编号**: 1000-1298(2013)08-0143-05

Effect on Characteristics of Biomass Pellet Fuel for Short-term Storage

Tian Yishui　Zhang Zhongbo　Zhao Lixin　Yao Zonglu　Meng Haibo
(*Key Laboratory of Energy Resource Utilization from Agricultural Residues*, *Ministry of Agriculture*, *Chinese Academy of Agricultural Engineering*, *Beijing* 100125, *China*)

Abstract: In China, there are great difference in temperature and humidity in different regions. During the storage time, the characteristic of biomass pellet fuel will change, so the application of the fuel will also change. The corn stalks and wood pellet were tested with different storage method, temperature and humidity. The results showed that during the storage time, the temperature, humidity and storage method were the main factors which affected the total moisture of pellet fuel. When the humidity was larger than 70%, the corn stalks will appear mildew. The wood pellet will crack and mildew under the condition of high temperature and humidity.

Key words: Biomass　Pellet fuel　Storage　Temperature　Humidity

引言

近年来,随着农村社会经济全面发展和农民生活水平的提高,中国农村居民生活用能的消费总量不断增加,对商品能源的需求增长尤为迅速[1~2],这既消耗了大量的能源,又产生大量的温室气体。生物质颗粒燃料是由粉碎的固体生物质原料通过成型机压缩成圆柱形的生物质固体成型燃料,具有可再生和 CO_2 零排放等优势,可作为农村居民炊事采暖等燃料,具有广阔的发展前景[3~6]。

在生物质颗粒燃料储藏过程中,温度、湿度以及储藏方式的不同,可能引起生物质颗粒燃料水分、发热量及机械耐久性等特性的变化,从而对颗粒燃料的运输和应用产生不利影响。

目前,国内外对于温、湿度影响生物质颗粒燃料储藏特性的研究还很少[7~10]。对于生物质颗粒燃料的短期储藏温、湿度条件相关研究则未见报道。

本文通过密封袋装与平铺于托盘(露天)两种储藏方式,利用高低温湿热试验箱,针对玉米秸秆颗粒和木质颗粒 2 种燃料,开展短期储藏试验,测试全水分、发热量和机械耐久性,分析储藏过程中温、湿度对生物质特性的影响,以期为各地生物颗粒燃料

收稿日期: 2012-08-16　修回日期: 2012-09-20
*"十二五"国家科技支撑计划资助项目(2012BAD30B00)
作者简介: 田宜水,研究员,主要从事可再生能源技术和设备研究、开发与推广研究,E-mail: yishuit@yahoo.com
通讯作者: 赵立欣,研究员,博士,主要从事生物质能研究,E-mail: zhaolixin5092@gmail.com

储藏设计提供参考。

1 试验材料及方法

1.1 试验材料

选取 2009 年秋季北京市南郊地区的玉米秸秆和木质燃料(红松),由 HM485 型生物质固体燃料成型机压制而成。颗粒燃料依据 NY/T 1880—2010《生物质固体成型燃料样品制备方法》制备,颗粒燃料的规格为:直径 8 mm,长度 20 ~ 30 mm。

1.2 试验设备

主要包括:GDS - 225A 型高低温湿热试验箱(北京切克试验设备有限公司)、GJ - 2 封装式化验制样粉碎机(河南省鹤壁市天弘仪器有限公司)、BSA223S - CW 型分析天平(赛多利斯科学仪器有限公司)、PL2002 型电子天平(瑞士梅特勒-托利多公司)、101 - 1A 型电热鼓风干燥箱(河南省鹤壁市天弘仪器有限公司)、ZDHW - 5 型微机全自动量热仪(河南省鹤壁市天弘仪器有限公司)和 KER - 2400 型转鼓试验机。

1.3 试验方法

1.3.1 试验时间

高低温湿热试验箱工作环境温度要求为 0 ~ 40℃,相对湿度不大于 90%,空气温、湿度过高,会对高低温湿热试验箱的测量精确度产生影响。北京地区夏季温度、湿度较高不适宜做试验,为了尽量减少空气条件对试验的影响,试验时间选择在 2011 年 11 月至 2012 年 4 月期间进行。

1.3.2 试验设计

中国颗粒燃料生产厂家遍布南北,不同地区气候不同,温、湿度差异较大。试验拟采用单因素试验方法,并进行补充试验。

单因素试验。相对湿度设定为 40%,在不同温度下(低温 5℃、中温 20℃、高温 43℃)进行温度影响试验,以模拟中国不同地区气温。其中需要说明的是,0℃以下,一般微生物活动受到抑制,可不予考虑。温度设定为 25℃,在不同的相对湿度下(低湿 15%、中湿 45%、高湿 70%)进行湿度影响试验。

补充试验。根据单因素试验,玉米秸秆颗粒燃料在相对湿度 70% 时,出现轻微发霉现象,木质颗粒燃料表面无变化。为准确确定储藏条件,设计了 2 组补充试验:试验 1(25℃、相对湿度 60%)和试验 2(43℃、相对湿度 90%)。

1.3.3 试验测定参数选择及测试方法

生物质颗粒燃料应用前,一般以袋装或料仓等形式进行储藏,短期一般 5 ~ 7 d,长期一般在一个月以上。在储藏期内,储藏环境温度、湿度的不同,可能对颗粒燃料的理化特性产生影响,影响其运输和燃烧特性。其中,全水分变化会影响堆积密度和发热量,机械耐久性表征在贮藏、运输过程中的抗破碎能力,发热量反映颗粒燃料可供热能力。因此,试验选取全水分、机械耐久性和发热量作为试验测定指标,以获得温、湿度变化对特性的影响。试验在北京市南郊某工厂内进行,试验环境为普通厂房室内环境。

密封储藏是将燃料储藏于密封容器,防止尘土以及异物进入。每种颗粒燃料分别称量 1.5 kg,采用密封袋封装装袋,扎紧袋口,横向均匀放置于托盘。

露天储藏是将燃料储藏于料仓、简易棚仓或其他经特殊处理的露天位置上。每种颗粒燃料分别称量 1.5 kg,平铺放置于托盘中,使颗粒燃料与试验箱与特定温、湿度空气充分接触。

每组样品在高低温湿热试验箱中短期储藏 7 d 后,取出部分样品立即测试全水分,其他部分进行机械耐久性及发热量的测试。

全水分测定按 NY/T 1881.2—2010《生物质成型燃料试验方法 第 2 部分:全水分》进行,是在空气中,将生物质固体成型燃料样品置于 105℃ 的温度下干燥至质量恒定,然后根据样品质量损失并修正浮力作用进行计算。

发热量采用弹筒发热量测定方法,在氧弹中有过剩氧的情况下,在规定条件下燃烧单位质量试样所产生的热量为弹筒发热量。

机械耐久性按 NY/T 1881.8—2010《生物质成型燃料试验方法 第 8 部分:机械耐久性》规定,采用 KER - 2400 型转鼓试验机,在可控的振动下,使试验样品之间、样品与测试器内壁之间发生碰撞,然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性。

每个参数测量 2 次,取其平均值作为测试结果。

2 试验结果与分析

2.1 单因素试验

2.1.1 温度

(1)表观观察

2 种颗粒燃料在 3 种不同储藏温度下短期储藏 7 d,其表面颜色均未发生变化,玉米秸秆颗粒呈现黄褐色,木质颗粒为红紫色,燃料未出现发霉、长毛现象。说明在此温、湿度条件下,生物质颗粒燃料中的微生物活动得到有效的抑制。

(2)全水分

不同温度影响储藏试验颗粒燃料全水分变化规律如表 1 所示。可以看出,相对湿度为 40% 时,玉米秸秆和木质颗粒在不同温度下的全水分均有所下

降，说明在该温、湿度下，玉米秸秆和木质颗粒的平衡湿含量（干基）分别小于 11.0% 和 11.3%，颗粒燃料处于解湿状态。在燃料表面与空气的水蒸气分压差的作用下，水分由物料表面向气流扩散，并被气流携带走。如果储藏时间足够长，燃料最终将达到平衡湿含量状态。

表 1　温度对储藏试验颗粒燃料全水分的影响（干基）

Tab. 1　Effect of temperature on total moisture　%

燃料种类	储藏形式	初始值	温度/℃		
			5	20	43
玉米秸秆颗粒	密封	11.0	5.8	4.8	9.1
	露天	11.0	7.4	3.6	10.2
木质颗粒	密封	11.3	6.5	7.0	9.3
	露天	11.3	8.7	4.6	10.2

在露天状态下，玉米秸秆和木质颗粒的全水分在 43℃时最高，均为 10.2%。考虑到本试验温度设定为 5、20 和 43℃，其水蒸气分压分别为 3.49×10^2、9.36×10^2 和 3.459×10^3 Pa。可知，虽然相对湿度均为 40%，但温度较高时（43℃），空气中的水蒸气分压则较高，造成物料表面与空气的水蒸气分压差较低，干燥速率低；另外，生物质颗粒经成型后，较为致密，水分迁移速度较慢，在储藏 7 d 后燃料的全水分还较高，未达到平衡湿含量状态。

当环境温度过低（5℃）时，水蒸气分子极其不活跃，燃料表面的水蒸气分压偏低，储藏 7 d 后，其全水分仍维持在较高水平，分别为 7.4% 和 8.7%。

当温度 20℃时，物料表面的水蒸气分压较高，干燥速率高，秸秆和木质颗粒燃料全水分数值最低，分别为 3.6% 和 4.6%，基本可以认为是达到了平衡湿含量状态。

密封状态下，玉米秸秆和木质颗粒的全水分变化与露天状态下基本一致，但各温度变化范围较小，说明密封的储藏方式对水分蒸发有一定的抑制作用。值得注意的是，在 5℃和 43℃时，密封状态下的燃料的全水分均小于露天状态。考虑到密封袋相当于一个封闭空间，其空气中水蒸气含量应低于高低温湿热试验箱，燃料与空气中的水蒸气为达到动态平衡，需要失去更多的水分，造成燃料全水分的降低。

综上所述，在中湿条件下（相对湿度 40%）短期储藏，燃料基本处于解湿状态，全水分低于初始值。温度过高或过低时，干燥速率均较低，没有达到平衡湿含量。当温度 20℃时，干燥速率较高，基本可以认为是达到了平衡湿含量状态。

（3）机械耐久性

在不同温度下，玉米秸秆和木质颗粒的机械耐久性无显著变化，均大于 95%，符合要求（表 2）。可认为温度、湿度对玉米秸秆和木质颗粒燃料的机械耐久性影响不显著，在输送过程中可保持颗粒燃料的完整性而不被破坏。其中，玉米秸秆颗粒的机械耐久性有所下降，而木质颗粒燃料的机械耐久性则略有上升。这说明全水分对机械耐久性的影响与材料性质有关。

表 2　温度对储藏试验颗粒燃料机械耐久性的影响

Tab. 2　Effect of temperature on mechanical durability　%

燃料种类	储藏形式	初始值	温度/℃		
			5	20	43
玉米秸秆颗粒	密封	98.1	96.7	96.9	97.6
	露天	98.1	97.4	96.7	97.6
木质颗粒	密封	96.2	98.9	98.7	98.7
	露天	96.2	99.4	98.1	98.8

（4）发热量

表 3 为不同温度情况下，秸秆颗粒和木质燃料的发热量。可以看出，3 种温度下发热量均有所增加，这是因为通过解湿过程，其全水分降低，从而造成发热量上升，这对燃烧过程是有利的。

表 3　温度对储藏试验颗粒燃料低位发热量的影响

Tab. 3　Effect of temperature on calorific value　MJ/kg

燃料种类	储藏形式	初始值	温度/℃		
			5	20	43
玉米秸秆颗粒	密封	13.9	15.0	15.5	14.9
	露天	13.9	14.9	15.5	15.2
木质颗粒	密封	16.7	18.5	18.2	18.3
	露天	16.7	18.7	18.7	18.2

2.1.2　湿度

（1）表观观察

玉米秸秆和木质颗粒燃料储藏 7 d 后，在相对湿度为 15%、45% 时，其表面颜色均未发生变化，玉米秸秆颗粒呈现黄褐色，木质颗粒为红紫色，燃料未出现发霉、长毛现象。

当储藏相对湿度达到 70% 时，露天贮藏条件下，玉米秸秆颗粒燃料表面出现丝状的绿毛，如图 1 所示。说明在此温度和湿度条件下，玉米秸秆颗粒燃料出现了轻微的霉变现象，经过简单处理可进行试验（除去发霉部分）。其他几种情况则未发生任何变化。说明在温度 25℃、相对湿度 70% 条件下，玉米秸秆颗粒燃料中的微生物活动较为活跃，应避免在此环境下储藏。

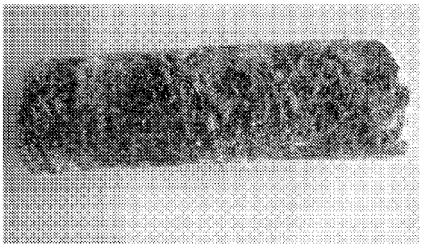

图 1 玉米秸秆颗粒燃料样貌(相对湿度 70%)

Fig. 1 Pellet fuel appearance of corn stalks

(2) 全水分

不同湿度储藏条件下,玉米秸秆和木质颗粒燃料的全水分变化规律如图 2 所示。

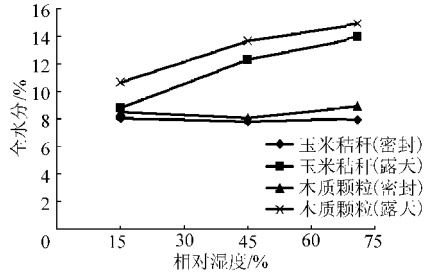

图 2 湿度对储藏试验颗粒燃料全水分的影响

Fig. 2 Effect of humidity on total moisture

露天情况下,随着环境空气相对湿度的增加,颗粒燃料的全水分均有所增加,趋向平衡湿含量状态。在相对湿度为 15% 时,玉米秸秆和木质颗粒全水分分别为 8.8% 和 10.7%,低于颗粒燃料的初始全水分;在相对湿度为 70% 时,则达到最大值,分别为 14.1% 和 15.1%。其中,木质颗粒燃料的变化幅度较大。这说明颗粒燃料的全水分在温度相同的情况下,相对湿度越高,燃料的全水分则越大。

在使用密封袋密封的情况下,其全水分基本保持不变,玉米秸杆和木质颗粒分别在 7.8% ~8.1% 和 8.1% ~9.1%,且均低于其初始全水分。

综上所述,颗粒燃料的全水分与环境湿度、温度和储藏方式等有关。

(3) 机械耐久性

在不同湿度下玉米秸秆和木质颗粒燃料的机械耐久性皆大于 95%,如表 4 所示。全水分对机械耐久性的影响不显著。

表 4 湿度对储藏试验颗粒燃料机械耐久性的影响

Tab. 4 Effect of humidity on mechanical durability

%

燃料种类	储藏形式	初始值	相对湿度/%		
			15	45	70
玉米秸秆颗粒	密封	98.1	98.5	99.0	99.3
	露天	98.1	98.4	98.3	98.5
木质颗粒	密封	96.2	98.5	99.1	98.4
	露天	96.2	98.5	97.6	97.9

(4) 发热量

表 5 为不同湿度下,玉米秸秆颗粒和木质燃料的发热量。可以看出,3 种湿度下,发热量均有所变化,这是因为通过增湿或解湿过程,其全水分发生变化,从而造成发热量的变化。

表 5 湿度对储藏试验颗粒燃料低位发热量的影响

Tab. 5 Effect of humidity on calorific value

MJ/kg

燃料种类	储藏形式	初始值	相对湿度/%		
			15	45	70
玉米秸秆颗粒	密封	13.9	14.6	15.2	14.8
	露天	13.9	14.8	14.4	14.4
木质颗粒	密封	16.7	17.7	17.9	18.0
	露天	16.7	17.7	17.2	16.9

由上可知,玉米秸秆颗粒燃料虽然出现了轻微发霉的现象,但是其全水分等数值与其他湿度情况下的数值差距较小,说明颗粒燃料经简单处理可以保持其燃烧特性。但可以预见,如果储藏时间大于 7 d,颗粒燃料发霉现象会更加严重,应考虑增加通风除湿设施。

2.2 补充试验

2.2.1 试验 1

在单因素试验中,当相对湿度 70% 时,玉米秸秆颗粒燃料出现了发霉的现象,本试验选择相对湿度为 60%,储藏颗粒燃料 7 d,表观观察是否发霉,并进行特性试验。本试验的温度为 25℃。

试验结果表明:2 种不同储藏方式下,颗粒燃料均未出现发霉、长毛现象,可安全储藏。密封储藏条件下,玉米秸秆颗粒全水分为 7.3%,木质颗粒燃料为 8.6%。露天储藏条件下,玉米秸秆颗粒燃料全水分为 8.9%,木质颗粒燃料为 9.8%,高于密封储藏条件。颗粒燃料的机械耐久性并无大的变化,均大于 95%。玉米秸秆颗粒燃料密封储藏方式下,发热量为 14.8 MJ/kg,木质颗粒燃料为 18.0 MJ/kg。露天条件下,玉米秸秆颗粒燃料发热量为 14.5 MJ/kg,木质颗粒燃料为 17.9 MJ/kg,不同储藏形式在此温、湿度下,数值差距很小,并不影响燃烧性能。

由单因素试验知,玉米秸秆颗粒燃料在温度 25℃,相对湿度 70% 时,会产生发霉现象,而本组试验表明,温度 25℃,相对湿度 60% 时,未出现变质现象,玉米秸秆颗粒燃料储藏湿度应低于 60%。

2.2.2 试验 2

试验 2 温度为 43℃,相对湿度为 90%,本试验观察在高温、高湿情况下,颗粒燃料是否会发霉、变质。

试验结果表明:露天储藏条件下,当储藏湿度达到 90% 时,玉米秸秆颗粒燃料表面完全被霉菌覆盖

而且出现了白斑，如图 3 所示。说明在此相对湿度下，玉米秸秆颗粒燃料被黄曲霉菌侵蚀严重，颗粒燃料已完全不能使用。密封储藏的玉米秸秆颗粒燃料，由于隔绝空气，其表面颜色未发生变化，仍然呈现黄褐色，未出现发霉、长毛的现象。当储藏湿度达到 90% 时，木质颗粒燃料产生了严重的破裂，并且表面出现了长毛、发霉的现象，如图 4 所示。说明在此湿度下，木质颗粒燃料也霉菌侵蚀，颗粒燃料已不能使用。密封储藏的木质颗粒燃料，隔绝空气，在安全水分下，表面颜色未发生变化，仍然呈现红紫色，燃料未出现发霉、长毛的现象。

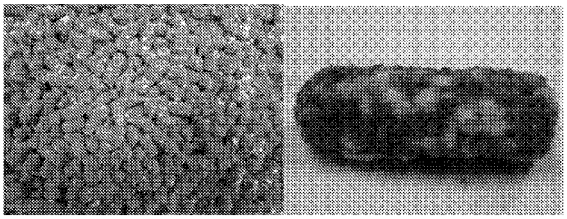

图 3　玉米秸秆颗粒燃料样貌（相对湿度 90%）

Fig. 3　Pellet fuel appearance of corn stalks

3　结论

（1）影响颗粒燃料全水分和发热量的主要因素是温度、相对湿度和储藏方式。其中，温度和相对湿度影响燃料和全水分和干燥速率。相对湿度越高，则全水分越高。封闭方式对水分蒸发有一定的抑制作用。

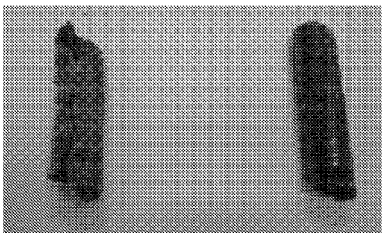

图 4　木质颗粒燃料样貌（相对湿度 90%）

Fig. 4　Pellet fuel appearance of wood pellet

（2）当温度为 25℃、相对湿度 70% 时，露天贮藏条件下，玉米秸秆颗粒燃料会出现长毛、发霉的现象，相对湿度为 60% 时未出现变质现象，玉米秸秆颗粒储藏相对湿度一般应低于 60%。在高湿地区，储藏玉米秸秆颗粒燃料时，应考虑增加通风除湿设施。

（3）木质颗粒燃料高温（43℃）、高湿相对湿度（90%）条件下，颗粒燃料表面会出现裂缝、发霉现象，在此条件下不宜长期储藏。

参　考　文　献

1　田宜水，赵立欣，孙丽英，等. 中国农村居民生活用能及 CO_2 排放情景分析[J]. 农业工程学报，2011，27(10)：206～211.
Tian Yishui, Zhao Lixin, Sun Liying, et al. Rural living energy utilization and CO_2 emissions scenario analysis in China[J]. Transactions of the CSAE, 2011, 27(10): 206～211. (in Chinese)

2　吴创之，周肇秋，阴秀丽，等. 我国生物质能源发展现状与思考[J]. 农业机械学报，2009，40(1)：91～99
Wu Chuangzhi, Zhou Zhaoqiu, Yin Xiuli, et al. Current status of biomass energy development in China[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2009, 40(1): 91～99. (in Chinese)

3　王久臣，戴林，田宜水，等. 中国生物质能产业发展现状及趋势分析[J]. 农业工程学报，2007，23(9)：276～282.
Wang Jiuchen, Dai Lin, Tian Yishui, et al. Analysis of the development status and trends of biomass energy industry in China[J]. Transactions of the CSAE, 2007, 23(9): 276～282. (in Chinese)

4　Sjaak Van Loo, Jaap Koppejan. Handbook of biomass combustion and co-firing [M]. Enschede: Twente University Press, 2002.

5　田宜水，孟海波，孙丽英. 秸秆能源化技术与工程[M]. 北京：人民邮电出版社，2010.

6　姚宗路，赵立欣，Ronnback M，等. 生物质颗粒燃料特性及其对燃烧的影响分析[J]. 农业机械学报，2010，41(10)：97～102.
Yao Zonglu, Zhao Lixin, Ronnback M, et al. Comparison on effect of characterization of biomass pellet fuels on combustion behavior[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2010, 41(10): 97～102. (in Chinese)

7　Athanasios A Rentizelas, Athanasios J Tolis, Ilias P Tatsiopoulos. Logistics issues of biomass: the storage problem and the multi-biomass supply chain[J]. Renewable Sustainable Energy Reviews, 2009, 13(4): 887～894.

8　Chico-Santamarta L, Humphries A C, Chaney K, et al. Microbial changes during the on-farm storage of canola (oilseed rape) straw bales and pellets[J]. Biomass Bioenerg, 2011, 35(7): 2 939～2 949.

9　Igathinathane C, Womac A R, Sokhansanj S, et al. Sorption equilibrium moisture characteristics of selected corn stover components[J]. Transactions of the ASAE, 2005, 48(4): 1 449～1 460.

10　Arabhosseini A, Huisman W, Muller J. Modeling of the equilibrium moisture content (EMC) of Miscanthus (*Miscanthus x giganteus*)[J]. Biomass Bioenerg, 2010, 34(4): 411～416.