

水稻秸秆与木屑混合原料热压成型试验

涂德浴^{1,2}, 李安心¹, 何贵生¹

(1. 安徽工业大学机械工程学院, 马鞍山 243032; 2. 农业部设施农业节能与废弃物处理重点实验室, 北京 100081)

摘要: 为提高水稻秸秆原料成型燃料的质量, 提出通过添加木质素含量较高的木屑原料即形成混合原料并通过试验的方法进行研究。首先进行对比试验, 以成型燃料的物理性能为指标, 在相同实验条件下对木屑、水稻秸秆和水稻秸秆与木屑 1:1 混合的原料进行热压成型试验。对比试验的结果表明小压力下 1:1 混合原料成型燃料的综合物理性能优于水稻秸秆成型燃料, 证明混合原料可提高单一水稻秸秆原理成型燃料的质量。但由于木屑原料本身的结构特性使得 1:1 混合原料成型燃料的抗渗水性较弱。因此为进一步提高混合原料成型燃料质量, 我们利用正交试验方法研究对于混合原料成型燃料各物性指标而言最显著影响因素及最佳参数组合并通过试验加以论证。试验结果表明: 针对不同性能指标, 各工艺参数的影响力不一致, 对于松弛密度、抗碎强度及抗压强度而言, 压力对其影响较大; 而对于抗渗水性而言, 原料混合比影响较大。对于松弛密度, 最佳成型参数(混合比、温度、压力)组合为 0.5:1, 70℃、31.11 MPa, 抗碎强度的成型参数最优组合为 2:1, 110℃、31.11 MPa, 抗渗水性和抗压强度的最佳成型参数组合为 1.5:1, 90℃、31.11 MPa。

关键词: 秸秆; 密度; 温度; 水稻; 木屑; 热压成型; 参数优化

doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2015.20.029

中图分类号: X712

文献标识码: A

文章编号: 1002-6819(2015)-19-0205-07

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.

doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2015.20.029 <http://www.tcsae.org>

Tu Deyu, Li Anxin, He Guisheng. Hot pressing forming experiment of the rice straw and sawdust mixed material[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2015, 31(20): 205—211. (in Chinese with English abstract) doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2015.20.029 <http://www.tcsae.org>

0 引言

生物质成型燃料是生物质原料经干燥、粉碎等预处理后, 在特定设备上被加工成具有一定形状、一定密度的固体燃料。生物质成型燃料和同密度的中质煤热值相当, 同时由于生物质能本身具有可再生、含氧量高、污染物排放低等特点, 使之成为煤炭的优质取代燃料^[1]。生物质固化成型技术是生物质推广利用中最为关键技术之一。近年来国内外的学者纷纷根据各国的实际情况研究了不同生物质成型燃料的固化成型技术。

Christofer 对挪威云杉木屑研究发现, 高压、低含水率可提高成型燃料松弛密度, 压力应 ≤ 50 MPa, 温度为 90℃时成型燃料表现出最大抗渗水性^[2]。英国的 Sudhagar 发现, 原料粒度对小麦秸秆成型燃料的松弛密度影响较小, 原料粒度 3.2 mm、含水率 12%的情况下玉米秸秆松弛密度最大^[3]。Sylvia 通过试验得出含水率对成型燃料的松弛密度和耐久性影响最大, 提前预压可以提高成型燃料的质量^[4]。Maria 对木材加工剩余物进行研究得出高温、低含水率、较小粒度条件下制得的成型燃料具有较大松弛密度和较好抗碎强度, 并且温度在 150℃时, 即使是在较小压力和较大含水率及较大粒径的条件下得到的成

型燃料的松弛密度及热值仍很高^[5]。

回彩娟对豆秆、木屑等五种原料进行冷压成型试验得到原料最佳含水率为 15%^[6], 并通过试验得出常温高压致密成型时含水率最好控制在 5%~15%范围内, 最高不能超过 22%, 其压力控制在 15~35 MPa 之间即可满足存放、运输要求^[7]。樊峰鸣研究了大粒径生物质成型燃料的物理特性得到: 原料含水率在 8%~15%时均很容易压缩成型, 12%左右时成型效果最佳, 且抗渗水性较好^[8]。王艳云等人对切碎棉秆采用电子万能试验机进行轴向压缩试验研究得到秸秆燃料的最优含水率应该控制在 10%~13%, 含水率 $< 7\%$ 时成型块不密实, 品质较差, 含水率 $> 16\%$ 会发生卸载现象, 不能成型^[9]。李在峰在不同含水率、不同压缩速度条件下, 对 6 种不同的生物质原料进行了冷态压缩成型试验, 并绘制出生物质压力—密度关系曲线, 发现同一种生物质在含水率不同时的压力—密度曲线各不相同, 但有一共同交点, 在该交点前后水分对密度的影响相反。压缩速度对成型密度影响较大, 在相同条件下, 压缩速度越大, 生物质成型密度越小^[10]。陈正宇等人以玉米秸秆、锯末、棉秆为原料, 以松弛密度为指标进行热压成型试验, 得到最佳参数范围为: 粒度 0~2 mm, 含水率 15%~23%, 温度 130~150℃、长径比 5.28, 并通过对玉米秸秆进行微观结构的分析认证以上结论^[11]。李庆达研究了水稻秸秆的含水率和原料粒径对其成型燃料物理特性的影响得出: 随着含水率的提高, 水稻秸秆成型燃料的松弛密度和抗渗水性呈现先增大后减小的变化趋势, 成型燃料的抗跌碎性随着水稻秸秆含水率的增加而降低, 稻草和稻壳的最佳含水率区间

收稿日期: 2015-07-13 修订日期: 2015-08-18

基金项目: 安徽省教育厅自然科学基金项目(KJ2013A060); 农业部设施农业节能与废弃物处理重点实验室开放课题(2013KT02)

作者简介: 涂德浴, 男, 安徽来安人, 博士, 副教授, 主要从事可再生能源及设备开发研究。马鞍山 安徽工业大学机械工程学院, 243032。

Email: tudayu@ahut.edu.cn

分别为 6.50%~7.80%和 6.80%~8.50%^[12]。

综合以上学者的研究我们发现,为了提高单一原料成型燃料物理性能,常用的方法是一定范围内降低原料含水率、提高加热温度、增大成型压力或者在原料中加入粘结剂^[13-14]。试验效果虽明显,但却使得生产过程繁琐化、加大了生产成本,且粘结剂会增大成型燃料的灰分含量从而降低燃料热值^[15]。木屑原料中木质素含量较高,而木质素作为一种天然有机物,其在一定温度和压力下可软化,粘附和聚合生物质颗粒从而能提高成型燃料的结合强度和耐久性起到粘结剂的作用^[16]。因此本文提出在水稻秸秆原料中加入木质素含量较高的木屑原料即形成混合原料来提高单一水稻秸秆原料成型燃料的质量,并通过试验方法进行探索研究。

1 材料与方法

1.1 试验材料

本次试验采用的材料是皖南地区 2012 年成熟水稻秸秆及木材加工厂剩余物—松木屑。试验原料的工业分析结果如表 1 所示。

表 1 原料工业分析

Table 1 Proximate analysis of raw material

种类 Species	工业分析 Proximate analysis/%			
	水分 Moisture	灰分 Ash	挥发分 Volatile	固定碳 Fixed Carbon
水稻 Rice straw	12	13	65	10
木屑 Wood chips	15	0.76	70.2	14.04

1.2 试验设备

本次成型试验使用的主要设备有:电子万能试验机(WE-300B,浙江路达机械)及温控加热装置。电子万能试验机内含液压驱动装置,可以自由调节压力大小,压力测量范围是 1~300 KN。温控加热装置主要由加热圈、硅探头及温控箱组成。根据试验需要,自行设计了成型模具,该模具主要由压杆、凹模、挡块、底板及加热装置组成。成型模孔内径为 30 mm,高度为 285 mm。试验装置如图 1 所示。

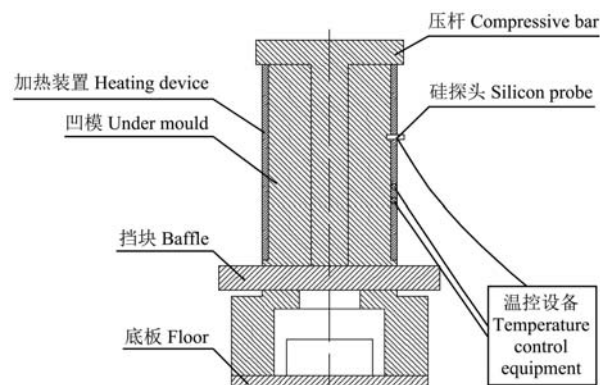


图 1 闭式压缩成型试验装置

Fig.1 Equipment of closed compressing molding experiment

1.3 试验方法

实验前首先将原料进行粉碎处理。然后用相应密度的网筛($\Phi 200 \times 50$,浙江上虞纱纺)进行筛分,得到所

需粒度的原料。本试验中水稻秸秆与木屑粒度均为 0~2 mm。其次在加热系统上设定好试验温度后打开加热设备开关,加热至设定温度后,系统自动跳至保温状态。用精度为 0.001 g 电子天平称量 5 g 原料填充进模具里。随后打开万能试验机,在压杆上施加压力(试验前,根据所需的压强大小通过公式换算成压力值输入试验机系统),推动其压缩物料,达到试验设定压力值后系统自动停止施压并保持当前压力 10 s(此为保型时间),关闭万能试验机。移除挡块后,再继续使用万能试验机将已成型的燃料退模,2 h 后进行物理性能测试。

1.4 物理性能指标及检测方法

成型燃料的品质包括燃烧特性品质及物理特性品质。物理特性品质不仅在一定程度上影响着燃烧特性品质,还直接决定了成型燃料的运输条件、贮藏条件及使用要求,因此通常将物理特性品质作为评价成型燃料的重要指标^[17]。

1.4.1 松弛密度的检测

刚出模时成型燃料的密度是最大的,但由于物料回弹和应力松弛,经过一段时间后(此为松弛时间),密度会缓慢减小直到趋于一个稳定值,此时的密度称为松弛密度。由于本次试验采用挤压式成型,成型后的燃料外形规则,尺寸均匀,可直接测量计算其体积。参照 DB11/7541-2008 北京地方标准^[18]和 R. Brereton^[5]的检测方法,将成型燃料放置于密封袋中 2 h(本次试验中规定的松弛时间为两小时)后用精度为 0.02 mm 的游标卡尺测量尺寸,根据公式(1)计算其松弛密度。每组试验重复 10 次,检测值剔除误差后取平均值,其计算公式如下:

$$\rho = \frac{4m}{\pi d^2 h} \quad (1)$$

式中: ρ 为松弛密度, g/cm^3 ; m 为成型燃料质量, g; d 为成型燃料直径, cm; h 为成型燃料长度, cm。

本试验制得成型燃料为棒状(截面直径 $D \geq 25 \text{ mm}$),根据 DB11/7541-2008 北京地方标准^[18],松弛密度 $\geq 0.6 \text{ g/cm}^3$ 即为合格产品。

1.4.2 耐久性测试方法

1) 抗碎强度

抗碎强度反映了成型燃料经过多次跌落和碰撞后抵抗变形的能力。按照 DB11/7541-2008 北京地方标准检测方法^[18]:将成型燃料从高 2 m 处自由落落到平坦的水泥地面上,共 5 次,测量跌落 5 次后的成型燃料占原成型燃料的质量百分数, $\geq 95\%$ ^[18]表示该成型燃料成型品质良好。选取相同成型条件下的 3 个成型燃料测试,取所有检测值的平均值,其计算公式如下:

$$DS = \frac{m_1}{m} \times 100\% \quad (2)$$

式中: DS 为抗碎强度; m_1 为经过抗碎强度测试后成型燃料的质量, g; m 为原成型燃料质量, g。

2) 抗渗水性

抗渗水性也是成型燃料需要具备的品质。抗渗水性好的成型燃料即使在运输时遇到暴雨天气也能确保不被雨水破坏本身的性能。参照 Lindley J A 的检测方法^[19],

测定方法如下：先向干净的烧杯内倒入 27℃ 的水 200 mL，然后将成型燃料置于水平面下 25 mm 处，30 s 后取出，滴干后计算成型燃料所吸收的水量与原成型燃料质量之比，即能反映成型燃料的抗渗水性。目前抗渗水性在国内还没有统一的标准，检测值越小说明抗渗水性越好。同样选取相同成型条件下的 3 个成型燃料测试，取检测值平均值。

3) 抗压强度

抗压强度指的是成型燃料所能承受外界施加的最大压力，它直接反应了燃料在外界压力下的抗变形能力。“闭式”成型燃料呈规则的圆柱体形状，燃料表面积大但长度小，一般来说轴向的承压能力较好，因此本试验中只进行成型燃料径向抗压强度的测试试验，并将径向承受的最大压力值作为最终的抗压强度。具体测试方法如下：将成型燃料放在万能试验机的工作台上，在燃料的径向做上标记，对标记处进行缓慢施压。当出现裂纹时开始观测，直到燃料完全断裂立刻停止施压，并记录下此失效压力 $F_{\text{径}}$ ，即为所能承受的最大压力值。压力值越大说明抗压强度越好。选取相同成型条件下的 3 个成

型燃料测试，取所有检测值的平均值。

1.5 试验设计

1.5.1 对比试验设计

分别以水稻秸秆、木屑、1:1 混合的水稻秸秆与木屑（下文中简称为 1:1 混合原料）为原材料，在相同试验条件下进行热压成型试验，通过对比成型燃料的物理性能研究不同原料成型燃料的特点。

1.5.2 正交试验设计

在对比试验研究基础上，为进一步研究压力、温度、混合比等参数对混合原料成型燃料质量的影响，我们利用正交试验方法，设计了一组三因素四水平的正交试验。

2 结果分析与讨论

2.1 对比试验结果分析

将粒度为 0~2 mm 的水稻秸秆、木屑及 1:1 混合原料分别在 50℃ 温度、不同压力下（8.89 MPa、13.33 MPa、22.22 MPa、31.11 MPa、40.00 MPa、44.44 MPa）进行热压成型试验，试验结束后检测成型燃料各物性指标。试验结果见图 2。

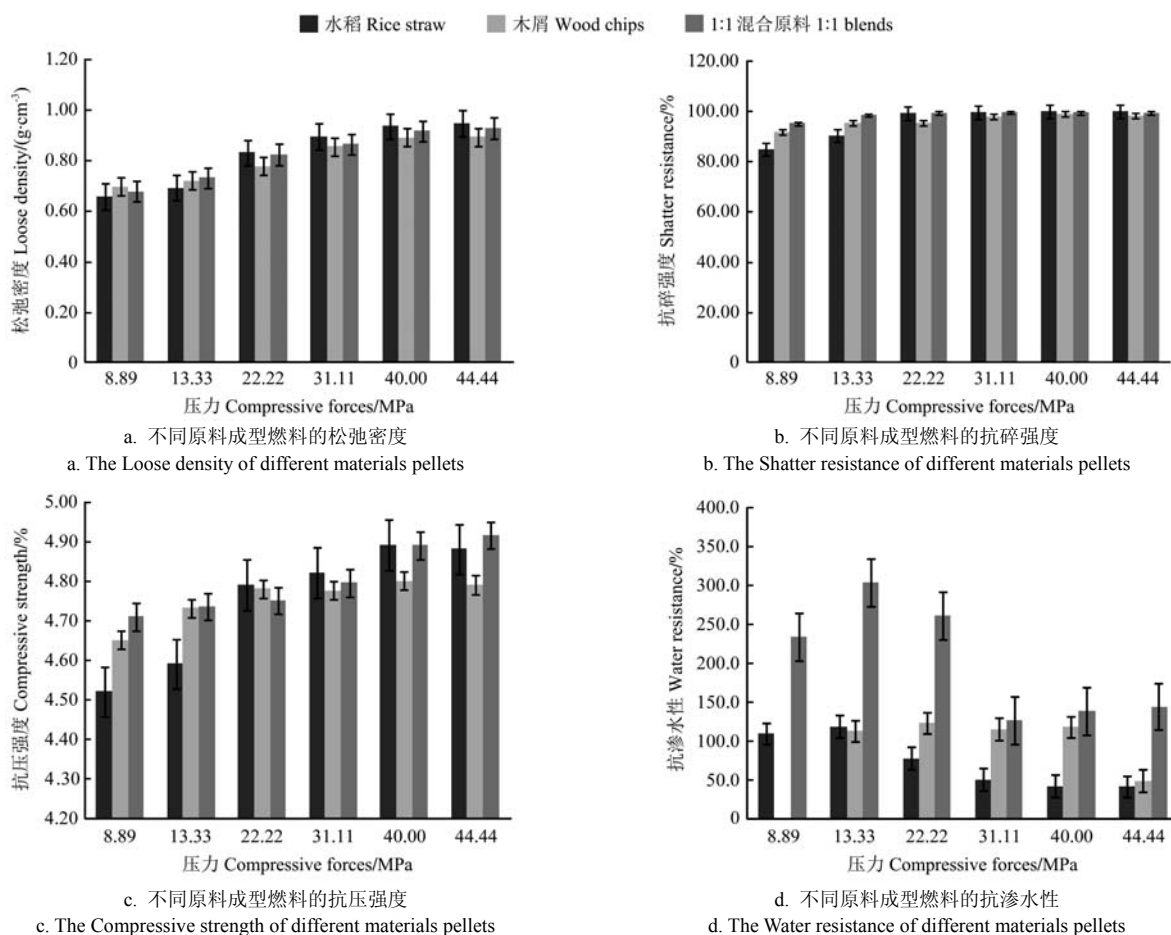


图 2 不同原料成型燃料的物理性能

Fig.2 Physical properties of different materials pellets

由图 2a 可知，三种原料成型燃料的松弛密度随着压力的增大均呈现出先增大后平缓的趋势。其中水稻秸秆成型燃料随压力的增大变化较大。13.33 MPa 压力下水稻秸秆成型燃料的松弛密度为 0.69 g/cm³。当压力为 22.22 MPa 时，水稻秸秆成型燃料的松弛密度增长到

0.83 g/cm³，增长较大。这是由于在成型初期，散布于原料间的水和空气在压力作用下被排出，秸秆间隙不断减小，体积也随之迅速减小，因此成型燃料松弛密度大幅度上升。但是松弛密度并不是随着压力的增大一直增大。当压力增长至 40 MPa 后，水稻秸秆成型燃料的松弛

密度基本维持在 0.94 g/cm^3 , 上下波动较小。这是由于随着压力的增大成型经过过渡阶段到达压实阶段, 此阶段中原料粒径及颗粒内部间隙已经基本被填充完毕, 因此随着压力的增大成型燃料松弛密度变化不大。木屑和 1:1 混合原料成型燃料的松弛密度随着压力的增大缓慢增长。压力为 8.89 MPa 时, 水稻秸秆、木屑、混合原料成型燃料的松弛密度分别为 $0.66, 0.69, 0.68 \text{ g/cm}^3$ 均达标。由于木屑中木质素含量较高, 而木质素在成型过程中经软化后具有粘结剂的作用, 因此在压力 $< 22.22 \text{ MPa}$ 时, 木屑及 1:1 混合原料成型燃料的松弛密度均大于水稻秸秆成型燃料。当压力增大至 22.22 MPa 时, 木屑成型燃料的松弛密度为 0.77 g/cm^3 , 水稻秸秆成型燃料与 1:1 混合原料成型燃料增长至 0.83 g/cm^3 左右。通过以上分析得到: 较小压力下 1:1 混合原料成型燃料的松弛密度比水稻秸秆成型燃料的松弛密度要高

从图 2b 可以看到, 相同压力下, 水稻秸秆、木屑以及 1:1 混合原料成型燃料的抗碎强度有很大的差异。压力 8.89 MPa 时, 水稻秸秆、木屑、1:1 混合原料成型燃料的抗碎强度分别为 $84.61\%, 91.49\%, 94.83\%$, 1:1 混合原料成型燃料的抗碎强度最大。当压力增至 13.33 MPa 时, 木屑以及 1:1 混合原料成型燃料的抗碎强度分别为 $95.01\%, 98.15\%$ 抗碎强度较好, 而水稻秸秆成型燃料抗碎强度为 89.95% , 未达标准。压力增至 22.22 MPa 时, 木屑原料成型燃料抗碎强度为 95% , 相对于 13.33 MPa 压力下成型燃料抗碎强度无明显变化; 水稻秸秆成型燃料抗碎强度为 98.93% , 达标; 而此时 1:1 混合原料成型燃料的抗碎强度为 99.08% 。当压力大于 22.22 MPa 后, 三种原料成型燃料的抗碎强度都趋于某一定值。因此, 可以得出较小压力下, 相对于水稻秸秆原料 1:1 混合原料成型燃料的抗碎强度较好。

由图 2c 可知, 当压力小于 13.33 MPa 时, 1:1 混合原料的抗压强度最大, 即 1:1 混合原料 $>$ 木屑 $>$ 水稻。当压力为 22.22 MPa 时, 水稻秸秆抗压强度达到 4.79 KN , 与木屑成型燃料的抗压强度相近。1:1 混合原料成型燃

料抗压强度随着压力的增长变化不大, 趋于稳定状态。因此, 得到在较小压力下得到具有较好抗压强度的 1:1 混合原料成型燃料。

由图 2d 可知, 8.89 MPa 压力下水稻秸秆成型燃料的抗渗水性最好, 木屑原料成型燃料在抗渗水性检测时, 30 s 内几乎完全松散在烧杯中, 无法检测。这是因为相对于水稻秸秆, 木屑结构中蜡质含量低, 纤维结构较为酥松, 密度小, 易吸水膨胀, 而较小压力制得的成型燃料内部间粘结不紧致, 原料粒子间的粘结作用力较小。随着压力的增加, 三种原料成型燃料的抗渗水性逐渐变好。其中水稻秸秆成型燃料的抗渗水性最佳。

相对于以往学者 (吴杰, 王艳云^[9,20]) 的实验研究, 本试验制得的成型燃料在抗渗水性测试时吸水量较大, 这主要是由于本实验制得的颗粒较小, 在保证松弛密度要求的情况下 ($\leq 0.6 \text{ g/cm}^3$) 压力较小, 加之木屑原料本身的结构特征, 使得此工况下制得的成型燃料抗渗水性较差。成型燃料抗吸湿性是指将成型燃料放置在恒定温度和水分含量的容器中直至质量恒定后所吸收的水量^[2]。成型燃料存储时一般都会采取防水措施, 因此抗吸湿性最能指导实际生产中对储备和运输条件的要求。但由于试验条件的限制, 本实验选择了检测其抗渗水性, 抗渗水性检测条件比实际储存和运输的条件恶劣, 因此在后续成型燃料实验研究中尽量选取抗吸湿性为检测标准。

由对比试验结果我们知道, 较小压力下 1:1 混合原料成型燃料综合物理性能比水稻秸秆成型燃料好。但是由于木屑本身的结构特点使得 1:1 混合原料成型燃料的抗渗水性较差, 因此有必要进一步对混合原料成型燃料进行研究。

2.2 正交试验结果分析

以混合原料为研究对象, 利用正交试验方法, 设计了一组三因素四水平的正交试验, 令 A、B、C 分别代表混合比、温度、压力, 测试松弛密度 Y_1 、抗碎强度 Y_2 、抗渗水性 Y_3 、抗压强度 Y_4 。选择正交表 $L_{16}(4^5)$, 共 16 组试验, 每组做 10 个重复, 试验结果见表 2。

表 2 正交试验试验安排与结果
Table 2 Arrangement and results of orthogonal experiment

试验号 No.	A: 混合比 A: Mixing ratio	B: 温度 B: Temperature/ ℃	C: 压力 C: Compressive forces/MPa	Y_1 : 松弛密度 Y_1 : Loose density/ ($\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$)	Y_2 : 抗碎强度 Y_2 : Shatter resistance/%	Y_3 : 抗压强度 Y_3 : Compressive strength/KN	Y_4 : 抗渗水性 Y_4 : Water resistance/%
1	0.5:1	50	4.44	0.658	90.704	4.540	135.207
2	0.5:1	70	13.33	0.743	94.953	4.715	107.661
3	0.5:1	90	22.22	0.806	97.950	4.810	82.304
4	0.5:1	110	31.11	0.826	98.276	4.800	64.647
5	1:1	50	13.33	0.727	96.098	4.750	232.278
6	1:1	70	4.44	0.688	91.771	4.720	147.904
7	1:1	90	31.11	0.811	97.855	4.815	129.028
8	1:1	110	22.22	0.760	97.967	4.765	131.922
9	1.5:1	50	22.22	0.778	96.956	4.735	283.903
10	1.5:1	70	31.11	0.827	98.753	4.825	224.301
11	1.5:1	90	4.44	0.660	94.265	4.725	184.361
12	1.5:1	110	13.33	0.717	97.288	4.785	148.788
13	2:1	50	31.11	0.802	96.225	4.765	319.837
14	2:1	70	22.22	0.779	97.742	4.750	290.135
15	2:1	90	13.33	0.722	97.788	4.785	263.804
16	2:1	110	4.44	0.663	96.291	4.755	163.504

将试验结果导入 DESIGN EXPERT8.0 软件，利用正交设计中多指标分析方法——综合平衡法，可以得到代表试验指标的平均值 K 和极差 R （ R 表示试验中各因素对指标的影响显著性），继而得到对于各物理性能而言影响最大的因素及其最优组合。具体结果见表 3。

1) 松弛密度结果分析

通过比较表 3 中的数据，显然可知：

$kA_1 > kA_2 > kA_3 > kA_4$ ； $kB_2 > kB_3 = kB_1 = kB_4$ ；

$kC_4 > kC_3 > kC_2 > kC_1$ ； $RC > RB > RA$ ；

由极差的大小可知，对于松弛密度来说对于松弛密度而言，压力因素影响较大，这与吴杰、盛奎川^[20]曾得到的压力与密度变化表现为指数关系的结论相一致。由均值大小可知， A_1 为 A 因素最优水平， B_2 为 B 因素最优水平， C_4 为 C 因素最优水平，所以影响因素最优组合为 $A_1B_2C_4$ ，即：混合比 0.5：1、温度 70℃、压力 31.11 MPa。

2) 抗碎强度结果分析

通过比较表 3 中的数据，可得：

$kA_4 > kA_3 > kA_2 > kA_1$ ； $kB_4 > kB_3 > kB_2 > kB_1$ ；

$kC_4 > kC_3 > kC_2 > kC_1$ ； $RC > RB > RA$ ；

由极差的大小可知，对于抗碎强度来说，影响因素的重要程度依次为：压力>温度>混合比。由均值大小可知， A_4 为 A 因素最优水平， B_4 为 B 因素最优水平， C_4 为 C 因素最优水平。因此对于抗碎强度，成型参数最优组合为：混合比 2：1、温度 110℃、压力 31.11 MPa。

3) 抗压强度结果分析

通过比较表 3 中的数据，显然可得：

$kA_3 > kA_4 > kA_2 > kA_1$ ； $kB_3 > kB_3 > kB_2 > kB_1$ ；

$kC_4 > kC_3 > kC_2 > kC_1$ ； $RC > RB > RA$ ；

由极差的大小可知，对于抗压强度来说，影响因素的重要程度依次为：压力>温度>混合比。由均值大小可知， A_3 为 A 因素最优水平， B_3 为 B 因素最优水平， C_4 为 C 因素最优水平。所以影响因素最优组合为 $A_3B_3C_4$ ，即对于抗渗水性，成型参数最优组合为：混合比 1.5：1、温度 90℃、压力 31.11 MPa。

4) 抗渗水性结果分析

通过比较表 3 中的数据，显然可得：

$kA_2 > kA_2 > kA_3 > kA_4$ ； $kB_4 > kB_3 > kB_2 > kB_1$ ；

$kC_1 > kC_4 > kC_2 > kC_3$ ； $RA > RB > RC$ ；

由极差的大小可知，对于抗渗水性来说，影响因素的重要程度依次为：混合比>温度>压力。由均值大小可知， A_2 为 A 因素最优水平， B_4 为 B 因素最优水平， C_1 为 C 因素最优水平。所以影响因素最优组合为 $A_3B_3C_4$ ，即对于抗渗水性来说，成型参数最优组合为：混合比 1.5：1、温度 90℃、压力 31.11 MPa。

5) 综合物理性能结果分析

压力因素对于成型燃料的松弛密度、抗碎强度及抗压强度影响较大，而且以取 31.11Mpa 为最佳。对于抗渗水性而言，压力不是最大影响因素，但取 31.11Mpa 也是最好的。

温度因素对于成型燃料的四项指标而言都不是最主

要的影响因素，对于抗压强度和抗渗水性来说取 90℃为最佳，而对于松弛密度和碎强度而言则分别为 70℃和 110℃。综合考虑温度取 90℃最佳。

混合比对于成型燃料的抗渗水性影响最大，且 1.5：1 时抗渗水性最大。对于成型燃料的松弛密度、抗压强度及抗碎强度来说，混合比都是影响最小的因素，综合考虑最后选取混合比为 1.5：1。

综合以上分析我们得到，成型燃料的综合物理特性的最佳参数组合为 $A_3B_3C_4$ 混合比 1.5：1、温度 90℃、压力 31.11 MPa

表 3 正交试验三因素四水平下成型产品的物理特性

Table 3 Physical properties of compressed fuel under three factors four levels orthogonal experiment

指标 Index		影响因素 Factors		
		A: 混合比 A: Mixing ratio	B: 温度 B: Temperature/ ℃	C: 压力 C: Compressive forces/MPa
Y ₁ : 松弛密度 Y ₁ : Loose density (g·cm ⁻³)	k ₁	0.758	0.741	0.667
	k ₂	0.747	0.759	0.727
	k ₃	0.745	0.750	0.781
	k ₄	0.742	0.741	0.817
	R	0.017	0.018	0.149
Y ₂ : 抗碎强度 Y ₂ : Shatter resistance/%	k ₁	95.471	94.995	93.258
	k ₂	95.923	95.805	96.532
	k ₃	96.815	96.965	97.654
	k ₄	97.011	97.455	97.777
	R	1.541	2.460	4.519
Y ₃ : 抗压强度 Y ₃ : Compressive strength/KN	k ₁	4.716	4.698	4.685
	k ₂	4.763	4.753	4.759
	k ₃	4.768	4.784	4.765
	k ₄	4.764	4.776	4.801
	R	0.051	0.086	0.116
Y ₄ : 抗渗水性 Y ₄ : Water resistance/%	k ₁	97.455	242.806	157.744
	k ₂	160.283	192.500	188.133
	k ₃	210.338	164.874	197.066
	k ₄	259.320	127.215	184.453
	R	161.865	115.591	39.322

2.3 正交试验结论验证

由正交试验分析可知：对于松弛密度来说最优组合为 $A_1B_2C_4$ ，与它最接近的是第 2 号试验；抗碎强度最佳参数组合为 $A_4B_4C_4$ ，与它最接近的是第 16 号试验；对于抗压强度而言最优组合为 $A_3B_3C_4$ ，与它最接近的是第 11 号试验；抗渗水性最佳参数组合为 $A_3B_3C_4$ ，与它最接近的是第 7 号试验。为验证所得结论，分别将各个物理性质最优参数组合作为试验组，与各个最优参数组合最相近的组合作为参照组（即松弛密度的试验组为 $A_1B_2C_4$ ，参照组为正交试验中的第 2 号试验；抗碎强度的试验组为 $A_4B_4C_4$ ，参照组为正交试验中的第 16 号试验；抗压强度的试验组为 $A_3B_3C_4$ ，参照组为正交试验中的第 11 号试验；抗渗水性的试验组为 $A_3B_3C_4$ ，参照组为正交试验中的第 7 号试验。）进行试验对比，试验结果见表 4。

表 4 验证试验结果
Table 4 Results of verification test

影响因素 Effect factors	松弛密度 Loose Density/(g·cm ⁻³)		抗碎强度 Shatter resistance/%		抗压强度 Compressive strength/KN		抗渗水性 Water resistance/%	
	试验组	参照组	试验组	参照组	试验组	参照组	试验组	参照组
	Treatment group	Reference group	Treatment group	Reference group	Treatment group	Reference group	Treatment group	Reference group
混合比 Mixing ratio	0.5:1	0.5:1	2:1	2:1	1.5:1	1.5:1	1.5:1	1:1
温度 Temperature/℃	70	70	110	110	90	90	90	90
压力 Compressive forces/MPa	31.11	13.33	31.11	4.44	31.11	4.44	31.11	31.11
检测值 Estimated value	0.902	0.743	98.84	96.2911	4.76	4.725	109.128	129.028

由表 4 可知, 各试验组成型燃料的物理性能均比参照组优秀, 因此正交试验结果得以论证。

3 结 论

成型燃料的实际生产过程中, 原料和模具间会因摩擦产生热量, 而温度的变化会影响物料间的粘结机制从而降低压力。本试验为了更好地模拟实际生产状况, 引入了温度这一因素。通过对比试验得到, 相对于水稻秸秆成型燃料, 加入了木屑的 1:1 混合原料成型燃料具有较好的物理性能。通过对混合原料进行正交试验我们得到不同成型参数对于不同物性指标的影响程度不同。对于松弛密度而言, 压力的影响较大。同样, 对于抗碎强度与抗压强度而言, 压力也是影响最大的。但是对于抗渗水性而言, 混合原料中水稻秸秆与木屑的混合比的影响程度远远大于温度和压力。这主要是因为木屑的纤维结构较为酥松, 密度小, 易进水膨胀。本试验我们得到了对于不同物性指标的最佳参数组合并通过试验加以论证, 即: 对于松弛密度来说, 混合比、温度和压力分别为: 0.5:1、70℃、31.11MPa; 对于抗碎强度来说分别为: 混合比 2:1、温度 110℃、压力 31.11 MPa; 对于抗压强度来说分别为: 1.5:1、90℃、31.11 MPa; 对于抗渗水性来说分别为: 1.5:1、90℃、31.11 MPa。这一结论对实际生产具有重要指导意义。

[参 考 文 献]

- [1] 张百良. 生物质成型燃料技术与工程化[M]. 北京, 科学出版社, 2012.
- [2] Rhe'n C, Gref R, Sjo`stro`m M, et al. Effects of raw material moisture content, densification pressure and temperature on some properties of Norway spruce pellets[J]. Fuel Processing Technology, 2005, 87: 11—16.
- [3] Mani S, Tabil L G, Sokhansan S. Effects of compressive force, particle size and moisture content on mechanical properties of biomass pellets from grasses[J]. Biomass and Bioenergy, 2006: 648—654.
- [4] Larsson S H, Thyrel M, Geladi P, et al. High quality biofuel pellet production from pre-compacted low density raw materials[J]. Bioresource Technology, 2008: 7176—7182.
- [5] Carone M T, Pantaleo A, Pellerano A. Influence of process parameters and biomass characteristics on the durability of pellets from the pruning residues of *Olea europaea*[J]. Biomass and Bioenergy, 2011, 35(1): 402—410.
- [6] 回彩娟. 生物质燃料常温高压致密成型技术及成型机理研

究[D]. 北京: 北京林业大学, 2006.

Hui Caijian. The Studies of Biomass Solidifying Technology and Principle with High Pressure on Natural Conditions for Bio-fuel Making[D]. Beijing: Beijing Forestry University, 2006. (in Chinese with English abstract)

- [7] 回彩娟, 俞国胜. 影响生物质块状燃料常温高压致密成型因素的研究[J]. 林业机械与木工设备, 2005, 11(33): 10—14.
- [8] Hui Caijuan, Yu Guosheng. A Study on the Influencing Factors of Biomass Forming with High Pressure of General Concitions of Bio-materials Solidification Fuel[J]. Forestry Machinery & Woodworking Equipment, 2005, 11(33): 10—14. (in Chinese with English abstract)
- [8] 樊峰鸣, 张百良. 大粒径生物质成型燃料物理特性的研究[J]. 农业环境科学学报, 2005, 24(2): 398—402.
- [9] Fan Fengming, Zhang Bailiang. Physical properties from coarse biomass[J]. Journal of Agro-Environment Science. 2005, 24(2): 398—402. (in Chinese with English abstract)
- [9] 王艳云, 吴杰. 粉碎秸秆含水率对压缩成型的影响[J], 农机化研究, 2005, 5: 164—165.
- [10] 李在峰, 胡建军, 何晓峰, 等. 生物质冷态压缩特性曲线分析[J], 可再生能源, 2008, 26(4): 52—55.
- [10] Li Zaifeng, Hu Jianjun, He Xiaofeng, et al. Analysis on cold state pelletizing characteristic curve of biomass[J]. Renewable Energy Resources, 2008, 26(4): 52—55. (in Chinese with English abstract)
- [11] 陈正宇, 陆辛. 生物质压缩成型工艺参数[J], 塑性工程学报, 2012, 19(3): 30—33.
- [11] Chen Zhengyu, Lu Xin. Technology parameters study of biomass compression molding[J]. Journal of Plasticity Engineering, 2012, 19(3): 30—33. (in Chinese with English abstract)
- [12] 李庆达, 于海明, 张伟, 等. 秸秆生物质成型燃料物理特性研究[J]. 黑龙江八一农垦大学学报, 2012, 24(4): 11—14.
- [12] Li Qingda, Yu Haiming, Zhang Wei, et al. Study on the physical performance of the biomass densification briquetting fuel of straw[J]. Journal of Heilongjiang Bayi Agricultural University, 2012, 24(4): 11—14. (in Chinese with English abstract)
- [13] 孙亮, 孙清, 接鑫, 等. 稻草热压成型工艺参数试验[J], 农业机械学报, 2010, 41(1): 96—100.
- [13] Sun Liang, Sun Qing, Jie Xin, et al. Main technological parameters of rice hull hot briquetting[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2010, 41(1): 96—100. (in Chinese with English abstract)
- [14] 孙亮, 孙清, 佟玲, 等. 花生壳热压成型工艺参数的试验

- 研究[J], 中国农业大学学报, 2011, 6(5): 127—132.
 Sun Liang, Sun Qin, Tong Lin, et al. Study on technological parameters peanut hull hot briquetting[J]. Journal of China Agricultural University, 2011, 6(5): 127—132. (in Chinese with English abstract)
- [15] 郭会娟. 高含水率秸秆冷压成型工艺研究[A]. 经济策论(上)[C]. 2011 年.
- [16] 盛奎川, 吴杰. 生物质成型燃料的物理品质和成型机理的研究进展[J]. 农业工程学报, 2004, 20(3): 242—245.
 Sheng Kuichuan, Wu Jie. Review on physical properties and forming mechanisms of biomass briquettes[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2004, 20(3): 242—245. (in Chinese with English abstract)
- [17] 盛奎川, 钱湘群. 切碎棉杆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: 139—142.
 Sheng Kuichuan, Qian Xiangqun. Experimental studies on compressing chopped cotton stalks to high densities[J]. Journal of Zhejiang University (Agric. & Life Sci.), 2003, 29(2): 139—142. (in Chinese with English abstract)
- [18] DB11/7541-2008 北京地方标准.
- [19] Lindley J A, Vossoughi M. Physical properties of biomass briquets[J]. Transactions of the ASAE. 1989, 32(2): 361—366.
- [20] 吴杰, 盛奎川. 切碎棉杆压缩成型及物理特性的试验研究[J]. 石河子大学学报, 2003, 7(3): 235—238.
 Wu Jie, Sheng Kuichuan. Experimental study on chopping cotton stalk when compressed to high densities[J]. Journal of Shlhezhi University (Natural Science), 2003, 7(3): 235—238. (in Chinese with English abstract)

Hot pressing forming experiment of the rice straw and sawdust mixed material

Tu Deyu^{1,2}, Li Anxin¹, He Guisheng¹

(1. School of Mechanical Engineering, Anhui University of Technology, Maanshan 243032, China;

2. Key Laboratory of Energy Resource Utilization, Ministry of Agriculture, Beijing 100081, China)

Abstract: The former result of cold pressing forming experiments for rice straw showed that the rice straw cold pellets had poor quality. We found that wood chips had a high content of lignin which can take the function of the binder in high temperature condition. To improve the quality of rice straw pellets, it was proposed to take some wood chips added to the rice straw materials which could form the mixed raw material with the research carried out through the test method. We chose raw straw material which was produced in the south area of Anhui, 2012 and wood processing plant residues - pine sawdust. The equipment of closed compressing molding experiment were design by ourselves. Firstly, pellets' physical properties (loose density, shatter resistance, compressive forces and water resistance) were chosen as judgment criteria, and contrast hot pressing forming experiments was carried out to investigate the effect of different materials(rice straw, wood chips and 1:1 blends of rice straw and wood chips) on pellets. Two hours later after experiment, physical properties were tested, and the date were analyzed by DESIGN EXPERT8.0 with the orthogonal design method of multi-index analysis-comprehensive balance. By analyzing the results of contrast tests, we find that under lower compressive forces, the comprehensive physical (loose density, shatter resistance and compressive forces properties) of 1:1 blend material pellets were better than rice straw pellets and wood chips material pellets, and the results also indicated that added wood chips in the rice straw material can indeed improve the quality of single rice straw material pellets. However, because of the structural feature of wood chips material, the 1:1 blends of rice straw and wood chips material pellets were more weaker than rice straw and wood chips materials pellets in the respects of water resistance physical property. In the actual production, one or more physical properties should be requested high based on the specified use of pellets. Therefore, to further research the effect of blends on the quality of pellets, secondly, we take mixing materials of rice straw and wood chips as research object, a set of orthogonal hot pressing forming experiment with three factors and four levels were used to investigate the effect of compressive forces, mixing ratio and temperature on mixing materials pellets. It aimed to respectively get the most significant effect factors and the reasonable combination of three parameters (compressive forces, mixing ratio and temperature) for each pellets' physical property and the result will testify by test. The orthogonal experiment results indicated that each process parameter had different impact extent to various physical properties. Indexes of loose density, shatter resistance and compressive strength were strongly correlated with compressive force, and the mixing ratio has massive effect on the index of water resistance. The reasonable parameter combination for water resistance and compressive strength: the mixing ratio was 1.5:1 and the temperature was 90℃ and compressive strength was 31.11 MPa. The reasonable parameter combination (mixing ratio, temperature and compressive forces) for loose density was 0.5:1×70℃×31.11 MPa, and for shatter resistance was 2:1×110℃×31.11 MPa. Third, in order to testified the orthogonal experiment results, each reasonable parameter combination of physical property were text contrast with the reference group. The contrast group for physical properties (loose density, shatter resistance, compressive forces and water resistance) were respectively group two, group sixteen, group eleven, group seven. Other parameters of experiment were same as much as possible. Two hours later after experiment, physical properties (loose density, shatter resistance, compressive forces and water resistance) were tested and the date were analyzed. The result showed that each estimated value of treatment group are higher than reference group value, so the orthogonal experiment results were testified. The conclusion can provide technical support for industrialized production of rice straw molding fuel.

Key words: straw; density; temperature; rice; wood chips; hot pressing molding; parameter optimization