烟秆和木屑生物质颗粒燃料成型工艺参数优化

饶月[1]，刘芮[2]，杨飞[1]，陈重远[1]，岳涵鸿[1]，张霞[1]，蔡宗寿[1]

（1．云南农业大学机电工程学院，云南昆明650201；2．云南省烟草公司保山市公司，云南保山678000）

摘要：文章以烟秆和木屑为研究对象，首先研究了当生物质成型颗粒的成型特性最佳时，烟秆和木屑的混合比，并在此基础上进行了单因素试验和多因素正交试验，得到了关于生物质成型颗粒径向抗压力和密度的回归方程。研究结果表明：当烟秆含量为50%时，生物质成型颗粒的成型特性最佳；成型温度、原料含水率和成型压力对生物质成型颗粒密度和径向抗压力影响的大小顺序均为成型压力＞成型温度＞原料含水率；当成型压力为6.5kN，成型温度为101℃，原料含水率为13.5%时，生物质成型颗粒的径向抗压力取得最大值1.73kN，颗粒密度取得最大值1334.56kg/m^3。

0前言

保山市位于云南省西南部，包括腾冲、施甸、龙陵、昌宁4县以及隆阳区，国土面积为19637km^2。烤烟是保山市的主要经济产业，为当地农民提供了较多的经济收入和工作岗位。但是，烤烟的烘烤环节具有煤炭用量大、耗能多、技术要求高等缺点，这些缺点严重制约着烤烟产业的可持续发展。烟秆是烤烟生产过程中产生的农业废弃物，与其他农业秸秆类似，烟秆也具有热值低、密度小、物理形态不规则等特点，这给烟秆的能源化利用带来了很多困难，使得烟秆的利用率较低，大量的烟秆被丢弃或在田间焚烧，造成了资源浪费和环境污染[1]~[3]。张得政通过研究发现，烟秆的热值可达18.663MJ/kg，能够作为烤烟烘烤环节的燃料[4]。因此，以烟秆为主的农林废弃物经成型设备压制可制成生物质燃料替代燃煤，这种做法不仅可以节约烤烟的生产成本，减少污染，还能有效利用烟田废弃物，清洁烟田，减少病虫害的发生，实现“烟田废弃物-烘烤供热-炉灰-农田”的循环利用。

近年来，各国的研究人员都在进行颗粒成型燃料方面的研究。KaliyanN研究玉米芯成型颗粒燃料时发现，在成型压力为150MPa、原料湿度为9.4%、筛眼直径为2mm的条件下，当成型温度由25℃升高至85℃时，颗粒燃料的成型密度增加了15.4%[5]。LiuZG通过研究发现，当原料湿度由8%升高至16%时，竹子颗粒燃料的颗粒密度提高了24.9%[6]。AdapaPK研究了不同压力下大麦、油菜、燕麦和小麦秸秆颗粒的成型规律[7]。张霞通过研究发现，在成型压力为6kN、成型温度为100℃、原料含水率为12%、原料粒度为0.58mm的条件下，水葫芦颗粒燃料的成型品质最佳[8]。任珊珊通过研究得到了玉米秸秆最优的成型工艺，即物料的粒度为3.5mm、含水率为16%，模具的长径比为5：1、开口锥度为10°、保压孔长度为30mm[9]。

涂德浴通过试验得到了水稻秸秆的冷压成型最佳工艺参数，即成型压力为168MPa、原料含水率为21%、原料粒径为0~2mm[10]。黎演明以桉树皮和桑树枝为研究对象，研究了生物质成型的最佳工艺参数[11]。

迄今为止，有关烤烟秸秆生物质成型特性的研究较少，而将烤烟种植区的烟秆回收利用，不仅可以为当地的绿色烤烟做出贡献，还可以降低环境污染，提高烟农的收入。因此，本文以保山地区的烟秆和木屑为原料，采用CMT6104型电子万能试验机进行压缩和测试。首先分析两种原料的最佳混合比例，在此基础上，以成型颗粒的径向抗压力和密度为评价标准，通过对成型温度、含水率和成型压力的单因素试验和多因素正交试验，得出两种原料混合制备成型颗粒燃料的最佳工艺参数，最后利用SPSS和MATLAB软件对试验结果进行分析[12]。本文的研究成果不仅为工厂大规模生产高品质生物质颗粒燃料提供了理论和试验依据，也为颗粒燃料的推广利用提供了参考。

1材料与方法

1.1材料处理

将初步晾晒好的烟秆（收集于保山市西邑乡烟田）和木屑（收集于保山市西邑乡木材加工厂），分别用9FS-280型锤片式粉碎机（主轴转速为5000r/min）进行粉碎，并用TLS-200型振筛机筛选出直径不大于2mm的烟秆和木屑颗粒。按照国家农产品含水率测试标准（GB/T14095-2007）测试烟秆和木屑颗粒的含水率，测试结果表明，烟秆和木屑的含水率分别为22%和32%。烟秆和木屑的成分检测结果见表1。

表1 烟秆和木屑的成分检测结果

Table 1 Detection results of components of taking tobacco stems and wood chips

检测样品	成分/%		
	纤维素	半纤维素	木质素
木屑	23.8	22.1	11.3
烟秆	24.4	26.5	12.3

1.2试验设备

本文用到的试验设备包括CMT6104型电子万能试验机（用于生物质颗粒的成型和径向抗压力的测定）、HG101-2A型烤箱（最高温度为300°C，控制器灵敏度为1°C）、9FS-280型粉碎机、电子秤（精度为0.1g）、游标卡尺、喷壶、量杯、湿度测量计、筛子（筛径为2mm）和TLS-200型振筛机。生物质颗粒成型模具（圆柱状冲模的直径为8mm、凹模内径为8mm、长度约为160mm）和生物质成型颗粒如图1所示。

(a)生物质颗粒成型模具　　(b)生物质成型颗粒

图1 生物质颗粒成型模具和成型颗粒

Fig.1 Biomass pellet forming mold and briquetting particle

1.3试验设计与方法

1.3.1混合比例试验

原料粒
径越小，颗粒成型
时的接触面越大，成型的颗粒品质越
好（本研究中原料的粒径均不大于2mm）[13]
。综合考虑加工条件，固定成型压力为6.0kN、成型温度为100℃、原料含水率为16%，以原料中烟秆的质量分数作为变量，研究烟秆和木屑的混合比例对成型颗粒成型特性的影响。将预处理后的烟秆和木屑颗粒分别按照烟秆的质量分数为100%，75%，50%，25%和0%混合为5个水平的样品，然后在CMT6104型电子万能试验机上挤压成颗粒燃料，每个水平压制50粒，冷却后放于密封袋中备用。从每个水平的50粒样品中随机选取10粒生物质颗粒进行颗粒密度和径向抗压力的测试，记录并计算平均值。

1.3.2单因素试验

以烟秆和木屑混合样品（烟秆的质量分数为50%）作为原料，研究成型温度、原料含水率和成型压力分别作为变量时对成型颗粒成型特性的影响。由于生物质原料中的木质素会在70~110℃时变软，黏结力会增强，再加上生物质原料的含水率和成型压力过高或者过低时，生物质颗粒均很难成型，且成品的品质得不到保证[14]。所以在进行单因素试验时，成型温度的梯度为80，90，100，110，120℃，原料含水率的梯度为10%，12%，14%，16%，18%，成型压力的梯度为1.5，3.0，4.5，6.0，7.5kN。每个梯度压制50粒，冷却后放于密封袋中备用。从每个水平的50粒样品中随机选择10粒生物质颗粒进行颗粒密度和径向抗压力的测试，记录并计算平均值。

1.3.3多因素正交试验

以单因素试验的结果为基础，进行多因素的正交试验，正交试验的因素及水平见表2。

表 2　正交试验的因素与水平

Table 2　Factors and levels of orthogonal experiment

水平	因素		
	成型压力/kN	成型温度/℃	原料含水率/%
A	4.5	90	12
B	6.0	100	14
C	7.5	110	16

2结果与分析

2.1混合比例试验的结果与分析

在成型压力为6.0kN、成型温度为100℃、原料含水率为16%的条件下，原料中烟秆含量对成型颗粒燃料成型特性的影响如图2所示。

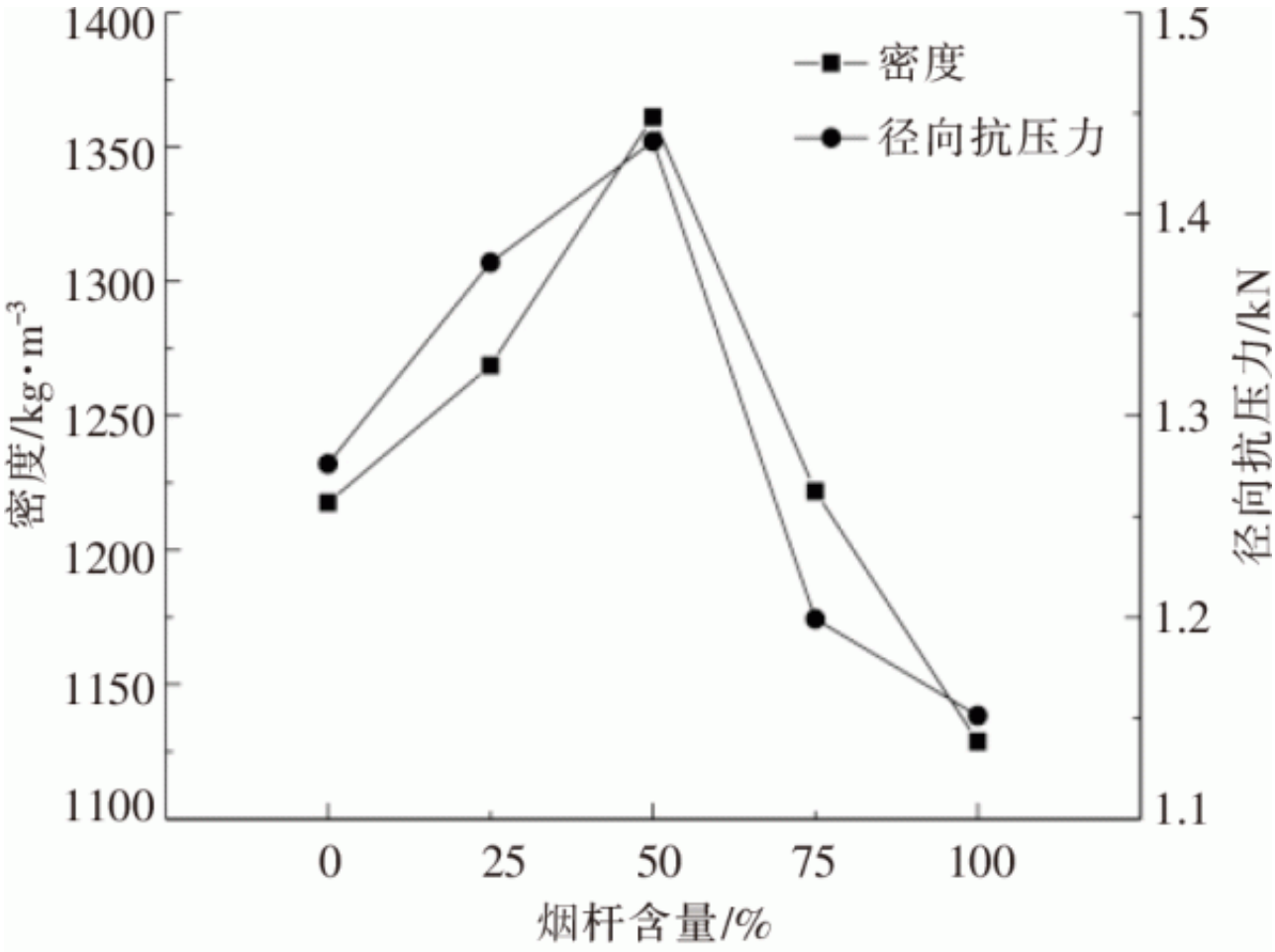

图 2　烟秆含量对成型颗粒成型特性的影响

Fig.2 Effect of Tobacco stems content on molding characteristics of molding particles

从图2可以看出，随着原料中烟秆含量的减少，成型颗粒的密度和径向抗压力均呈现出先上升后下降的变化趋势。这是因为不同材料中的纤维素、半纤维素、木质素和蛋白质等天然粘结剂的含量不同，在一定的生产条件下，这些粘结剂会促进生物质颗粒的成型。由于烟秆和木屑中各种起粘结和加强颗粒自身牢固作用的成分的含量有所不同，因此，当烟秆和木屑的混合比例合适时，有利于生物质颗粒的成型并提升生物质颗粒的品质。当原料中的烟秆含量由100%降低到50%时，成型颗粒的密度由1128.56kg/m^{3}增加到1361.03kg/m^3，增加了20.59%，径向抗压力由1.151kN增加到1.436kN，增加了24.76%；当原料中的烟秆含量继续减少直至原料全部为木屑时，成型颗粒的密度由1361.03kg/m^{3}降低到1217.59kg/m^3，降低了10.53%，径向抗压力由1.436kN降低到1.276kN，降低了11.14%。因此，当原料中的烟秆含量为50%时，生物质成型颗粒的成型品质最佳。

2.2单因素试验结果与分析

2.2.1成型温度对成型颗粒成型特性的影响

在成型压力为6.0kN，原料含水率为16%的成型条件下，成型温度对成型颗粒成型特性的影响如图3所示。

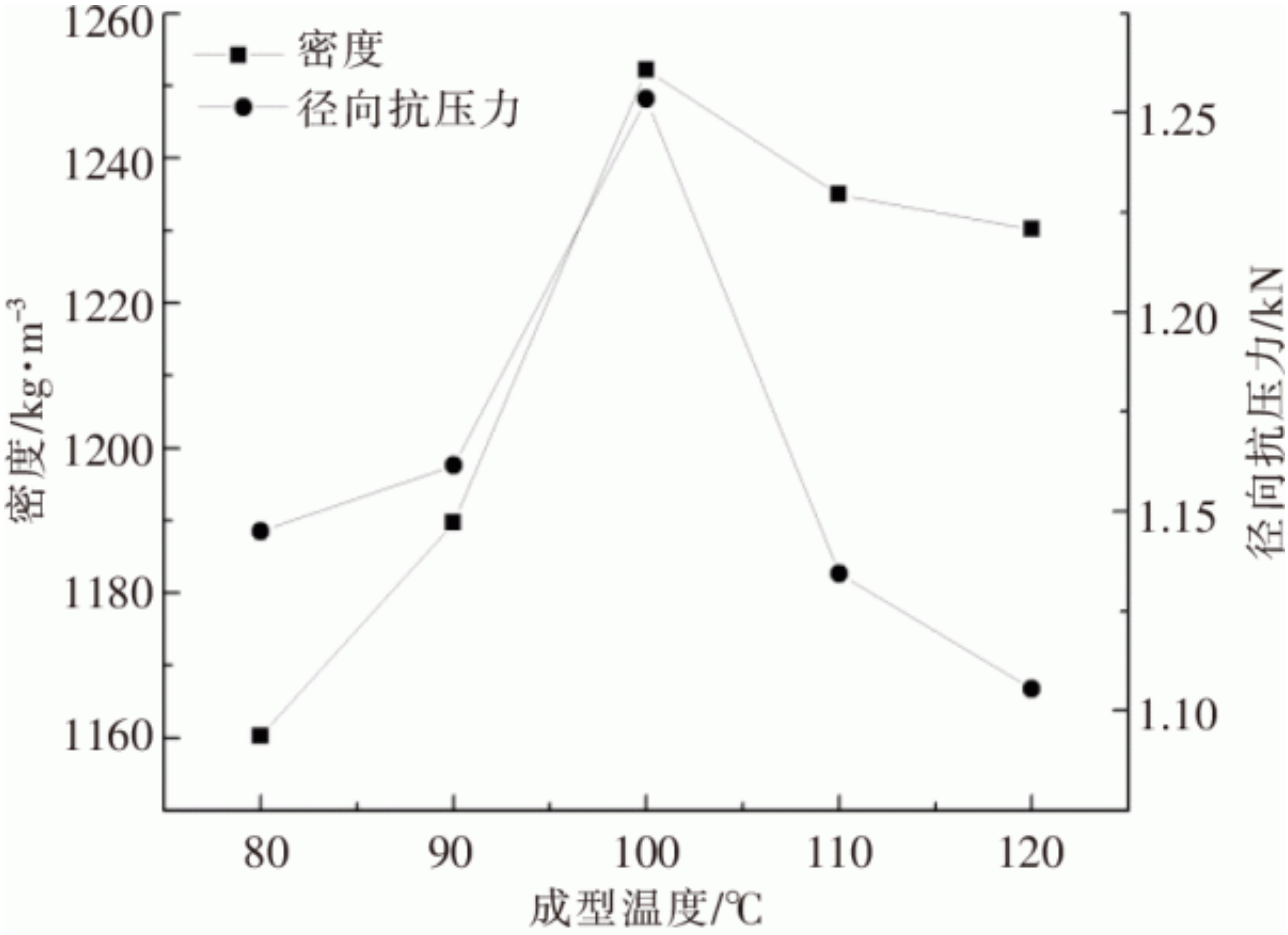

图 3　成型温度对成型颗粒成型特性的影响

Fig.3 Effect of molding temperature on molding characteristics of molding particles

从图3可以看出，成型颗粒的密度和径向抗压力均随着成型温度的升高而呈现出先上升后下降的变化趋势。当成型温度由80°C升高至100°C时，成型颗粒的密度由1160.2kg/m^{3}增大到了1252.14kg/m^3，径向抗压力由1.145kN增加至1.253kN，此时生物质成型颗粒的成型特性最好；当成型温度由100°C升高至120°C时，成型颗粒的密度由1252.14kg/m^{3}降低至1230.22kg/m^3，径向抗压力由1.253kN降低至1.115kN。这是因为在一定的成型条件下，适当地提升成型温度会影响原料内部的蛋白质、木质素和纤维素的粘结效果，使得原料变得软化，更易成型；如果成型温度过高，就会破坏原料内部蛋白质和其他粘结剂的粘结特性，过高的成型温度还会导致原料内部成分的变质，甚至变得焦糊，使得制备出的生物质成型颗粒品质变差。

2.2.2原料含水率对成型颗粒成型特性的影响

在成型压力为6.0kN，成型温度为100°C的成型条件下，原料含水率对成型颗粒成型特性的影响如图4所示。

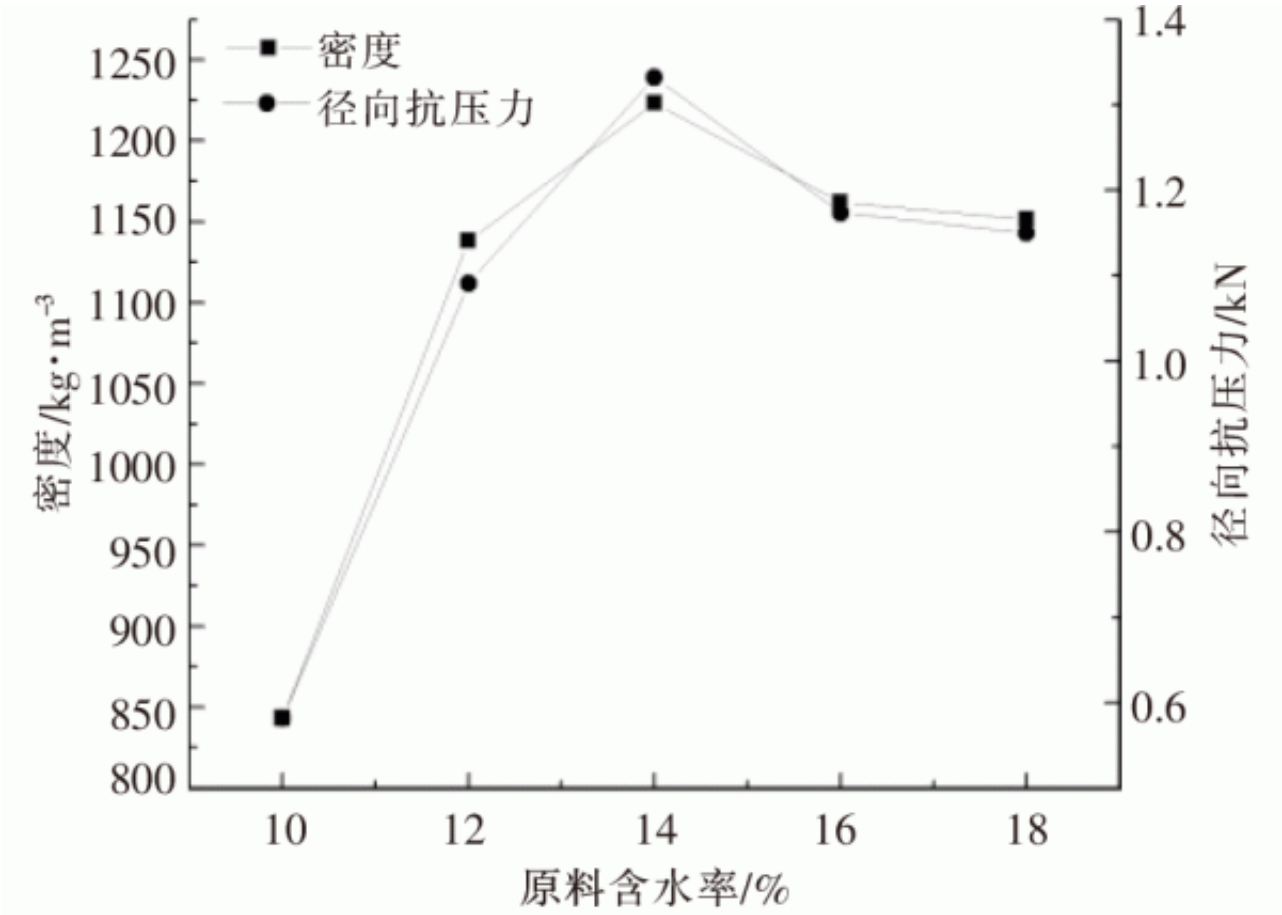

图 4　原料含水率对成型颗粒成型特性的影响

Fig.4 Effect of raw material moisture content on molding characteristics of molding particles

从图4可以看出，成型颗粒的密度和径向抗压力均随着原料含水率的增加而呈现出先上升后下降的变化趋势。当原料的含水率由10%升高至14%时，成型颗粒的密度由843.00kg/m^{3}增加至1223.2kg/m^3，径向抗压力由0.581kN增加至1.332kN，此时成型颗粒的成型特性最佳；当原料含水率由14%升高至18%时，成型颗粒的密度由1223.2kg/m^{3}降低至1151.38kg/m^3，径向抗压力则由1.332kN降低至1.150kN。这是因为在一定的成型条件下，适当地提高原料的含水率会影响原料内部成分的粘结效果，减少内部结构的缝隙，因此，提高原料的含水率会提升原料间的紧密作用，合适的含水率也会在一定程度上软化原料，使得颗粒更易成型；如果原料的含水率过高，则原料成型过程中会有多余的水分被挤压出来，从而影响成型设备的正常使用，过高的含水率还会破坏原料分子间的粘结作用，导致制备出的生物质成型颗粒品质下降。

2.2.3成型压力对成型颗粒成型特性的影响

在原料含水率为16%，成型温度为100°C的成型条件下，成型压力对成型颗粒成型特性的影响如图5所示。

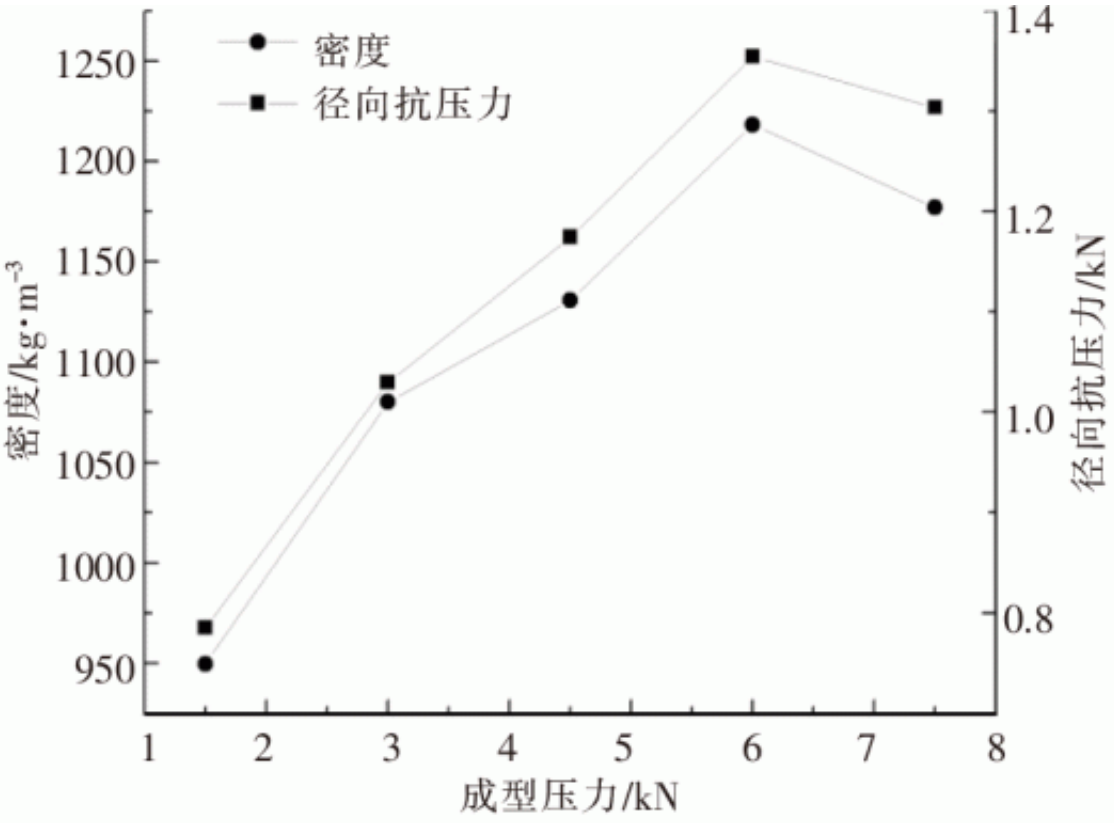

图 5　成型压力对成型颗粒成型特性的影响

Fig.5 Effect of molding pressure on molding characteristics of molding particles

从图5可以看出，成型颗粒的密度和径向抗压力均随着成型压力的增加而呈现出先上升后下降的变化趋势。当成型压力由1.5kN增加至6.0kN时，成型颗粒的密度由967.55kg/m^{3}增加至1252.14kg/m^3，径向抗压力由0.749kN增加至1.253kN，此时生物质成型颗粒的成型特性最佳；当成型压力由6.0kN增加至7.5kN时，成型颗粒的密度由1252.14kg/m^{3}降低至1226.66kg/m^3，径向抗压力由1.253kN降低至1.204kN。

这是因为在一定的成型条件下，适当地增加成型压力会影响原料内部的蛋白质、木质素和纤维素的粘结效果，这些天然的粘结剂在成型压力的作用下会发生相应的物理化学反应，提高成型压力可以较大程度地压缩生物质颗粒的体积；如果成型压力过高则会破坏原料的内部结构，造成颗粒内部产生裂纹，使得制备出的生物质成型颗粒品质变差。

2.3多因素试验结果与分析

2.3.1正交试验结果

以成型压力、成型温度和原料含水率这3个因素作为自变量，以成型颗粒的密度和径向抗压力作为因变量，设计并进行多因素正交试验，试验结果见表3。

表 3　正交试验结果

Table 3 The results of orthogonal test

编号	成型压力 kN	成型温度 ℃	原料含水率 %	密度 kg/m³	径向抗压力 kN
1	A	A	A	1 136.265	1.295
2	A	B	B	1 153.747	1.186
3	A	C	C	1 157.764	1.304
4	B	A	C	1 119.518	0.909
5	B	B	A	1 166.258	1.256
6	B	C	B	1 224.859	1.424
7	C	A	B	1 200.033	1.300
8	C	B	C	1 206.853	1.180
9	C	C	A	1 234.304	1.425

2.3.2SPSS回归分析

应用 IBM SPSS Statistics 20 软件，对正交试验结果进行线性回归分析。分别以径向抗压力(Y_1)、颗粒密度为(Y_2)为目标函数，以成型压力(X_1)、成型温度(X_2)、原来含水率(X_3)为自变量，分析 3 个自变量及它们的交互作用和二次项对目标函数值的影响。在 α=0.05 下，剔除不显著项可得：

$$Y_1=-6.272+2.454X_1+0.375X_2-0.210X_3-0.015X_1^2-0.043X_2^2-0.019X_3^2-0.034X_1X_3+0.007X_2X_3 \quad (1)$$

$$Y_2=-972.814+684.308X_1+58.612X_2-1.212X_3-48.755X_1^2-0.174X_2^2-7.178X_3^2-7.542X_1X_3+2.537X_2X_3 \quad (2)$$

从式(1)中可以看出，自变量 X_1，X_2 和 X_3 的前边系数分别为 2.454，0.375 和−0.021，这说明成型压力对成型颗粒径向抗压力的影响力度较大，成型温度和原料含水率对成型颗粒径向抗压力的影响力度较小，且两者的影响力度差别不大。从式(2)中可以看出，自变量 X_1，X_2 和 X_3 的前边系数分别为 684.308，58.612 和−1.212，这说明成型压力、成型温度和原料含水率对成型颗粒密度的影响表现为成型压力最大，成型温度次之，原料含水率最小。

2.3.3 回归方程分析

径向抗压力与颗粒密度线性回归方程的拟合度见表 4。从表 4 可以看出，径向抗压力线性回归方程的相关系数 R =0.889，决定系数 R^2=0.790，颗粒密度线性回归方程的相关系数 R=0.875，决定系数 R^2=0.766。通过线性回归方程的拟合度分析结果可以看出，成型颗粒径向抗压力的变化占总变化的 79.0%，颗粒密度的变化占总变化的 76.6%，线性回归方程的拟合度较高。

表 4　径向抗压力与颗粒密度线性回归方程的拟合度

Table 4 Fitting degree of regression equation between optimal radial pressure resistance particle density

类别	模型	R	R^2	调整 R^2	估计误差
径向抗压力	1	0.889	0.790	0.773	0.668
颗粒密度	1	0.875	0.766	0.737	0.942

2.3.4MATLAB 优化参数组合

利用 MATLAB 软件分析有约束条件的径向抗压力与颗粒密度线性回归方程，得到了使成型

颗粒的成型特性最佳的工艺参数。对于成型颗粒的密度，MATLAB 软件的运行结果显示，当 X_1=6.725 1，X_2=100.633 1，X_3=13.682 6，即当成型压力约为 6.73 kN、成型温度约为 100.63 ℃、原料含水率约为 13.68%时，成型颗粒的密度取得最大值 1 334.56 kg/m^3。对于成型颗粒的径向抗压力，MATLAB 软件的运行结果显示，当 X_1=6.473 3，X_2=102.365 9，X_3=13.361 5，即当成型压力约为 6.47 kN、成型温度约为 102.37 ℃、原料含水率约为 13.36%时，成型颗粒的径向抗压力取得最大值 1.73 kN。

根据上述颗粒密度和径向抗压力分别达到最大值时的自变量取值，结合实际生产应用的方便性，统一调整自变量的取值为成型压力为6.5kN，成型温度为101℃，原料含水率为13.5%，在此条件下，生物质成型颗粒的径向抗压力取得最大值1.73kN，颗粒密度取得最大值1334.56kg/m^3。

3结论

①在其他成型工艺参数一定的条件下，当烟秆和木屑的混合比例为1：1时，烟秆和木屑成型颗粒的成型特性最佳；在其他成型工艺参数一定的条件下，当成型温度为100℃时，烟秆和木屑成型颗粒的成型特性最佳；在其他成型工艺参数一定的条件下，当原料含水率为14%时，烟秆和木屑成型颗粒的成型特性最佳；在其他成型工艺参数一定的条件下，当成型压力为6.0kN时，烟秆和木屑成型颗粒的成型特性最佳。

②烟秆和木屑成型颗粒的最佳成型工艺参数为成型压力为6.5kN，成型温度为101℃，原料含水率为13.5%，在此条件下，成型颗粒的径向抗压力为1.73kN，密度为1334.56kg/m^3。

参考文献：

[1] John J C,Paul D H,Joseph A B,et al. Annual energy outlook 2012,DOE/EIA -0383 [J].Energy Information Administration,2012,6:106-115.

[2] 王亚静,王飞,石祖梁,等.基于农业供给侧结构性改革背景的秸秆资源与利用研究[J].中国农业资源与区划,2017,38(6):13-20.

[3] 王彩霞.环境规制拐点与政府环境治理思维调整[J].宏观经济研究,2016(2):75-80.

[4] 张得政,张霞,杨飞,等.菌菇、木屑和烟秆颗粒燃料成

型特性研究[J].农机化研究,2017,39(10):241-245.

[5] Kaliyan N,Morey R V,Densification characteristics of corn cobs[J].Fuel Processing Technology,2010,91(5):559-565.

[6] Liu Z G, Quek A, Balasubramanian R, et al. Preparationand characterization of fuel pellets from woody biomass,agro-residues and their corresponding hydro chars [J].Applied Energy,2014,113 (1):1315-1322.

[7] Adapa P K,Tabil L G,Schoenau G J.Compression characteristics of selected ground agricultural biomass [J].Agricultural Engineering International,2009,11(6):1-19.

[8] 张霞,蔡宗寿,张得政,等.水葫芦颗粒燃料成型工艺优化[J].农业工程学报,2016,32(5):239-244.

[9] 任珊珊,葛正浩,张正钧.生物质燃料的成型工艺及微观成型机理研究[J].可再生能源,2018,36(2):185-

194.

[10] 涂德浴，李安心，何贵生.水稻秸秆冷压成型工艺参数优化[J].中国农业科技导报，2015，17(3)：56-62.

[11] 黎演明，黄志民，韦光贤，等.桉树皮和桑枝制备颗粒燃料成型工艺研究[J].广西科学，2015，22(6)：658-663.

[12] 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(11)：109-115.

[13] 张霞，蔡宗寿，陈丽红，等.生物质成型燃料致密成型机理及品质评价指标[J].可再生能源，2014，32(12)：1917-1921.

[14] 肖宏儒，宋卫东，钟成义，等.生物质成型燃料加工技术与装备的研究 [J]. 农业工程技术（新能源产业），2009(10)：16-23.

原文地址：http://www.china-nengyuan.com/tech/150491.html