新型油菜秸秆成型燃料成型工艺参数优化

韦瑶，孙军，雷振东

(南京林业大学材料科学与工程学院，南京210037)

摘要：为了提高油菜秸秆和造纸污泥两种废弃物的能源化利用效率，对掺入造纸污泥的油菜秸秆进行冷压成型。从污泥含量、成型压力、含水率和秸秆粒径四个方面对新型油菜秸秆成型燃料的物理性能进行测试，并以抗压强度作为衡量指标。通过单因素分析确定因素试验范围，再利用响应面法对试验结果进行分析。结果表明因素的影响主次顺序为成型压力＞含水率＞秸秆粒径＞污泥含量，新型油菜秸秆成型燃料的最佳成型工艺参数是：污泥含量25%，成型压力80kN，含水率15%，秸秆粒径＜1mm，这样可使成型燃料的抗压强度达到0.206kN。

中国作为农业大国，油菜的种植面积和每年总产值占到世界总和的五分之一，是世界上第二大的油菜生产国[1，2]。但油菜秸秆作为农业废弃物，大部分被丢弃荒废或者就地焚烧[3]，这样不仅占用宝贵的耕地面积，还污染了环境。因此可采用生物质成型技术对其进行资源化合理利用，生物质成型技术是近年来能够大量处理农业废弃物、发展前景广阔的生物质高效利用技术之一。由于冷压成型技术无需进行加热，有节省能源、保护生物质内部结构的优点[4，5]，因此采用冷压成型技术。

由于污泥具有粘结作用，在生物质中混合污泥以提高成型燃料的物理性能成为一个新的研究方向。蒋龙波[6]研究了城市污泥与典型生物质的混合成型，姜秋玥[7]对玉米秸秆混污泥燃料成型及其燃烧特性进行了研究，王爱民等[8]研究了以城市污泥为型焦黏结剂的工艺流程与机理。

因此，选取油菜秸秆为主要原料，添加造纸污泥为黏结剂，进行冷压成型，运用响应面法分析四个影响因素(污泥含量、成型压力、含水率、秸秆粒径)对成型燃料物理性能的影响，并分析出成型最优参数的组合，为油菜秸秆和造纸污泥的高效能源化利用奠定基础。

1材料与方法

1.1试验材料

油菜秸秆来自江苏北部地区，造纸污泥来自安徽的一所造纸厂。

1.2试验设备

试验的仪器主要为自制圆柱形成型模具、全自动压力试验机(济南恒瑞金试验机有限公司，YAW—300B型)、力学试验机(济南恒瑞金试验机有限公司，WDW—J5KN型)。全自动压力试验机和力学试验机均由电脑控制成型压力和压制速度。

1.3单因素影响分析

本试验经过前期的预实验和结合其他学者的研究成果，分析出影响新型油菜秸秆成型燃料的物理性能的因素主要有以下四个方面。

1.3.1污泥含量

由于造纸污泥具有粘结性，在油菜秸秆中加入造纸污泥有助于成型，但是造纸污泥相对于秸秆，其灰分较高，若是混入比例较高，不利于燃烧[9，10]。因此，本实验综合考虑，选择5%～25%的研究区间。

1.3.2成型压力

一般成型压力越大，原料越容易成型，制出的成型燃料物理性能越好。但随着成型压力到一定值后，成型燃料的密度、抗压强度等指标会趋于稳定[11]。而且过高的成型压力会增加工艺成本和对成型设备的要求。因此，本实验综合考虑，选择40～80kN的成型压力区间。

1.3.3含水率

水分可以作为一种“润滑剂”减小成型过程中原料颗粒间的摩擦[12]，从而有助于成型，但是过高或者过低的含水率都不能很好地成型。而且油菜秸秆经过晒场暴晒出籽后的含水率较低。因此，本实验综合考虑，选择的含水率为5%～15%。

1.3.4原料粒径

一般原料粒径越小，成型效果越好，但相应的消耗的能源也就越大，工业成本越高。因此，本实验综合考虑，选择的油菜秸秆粒径＜3mm，造纸污泥粒径＜0.2mm。

1.4响应面试验设计

选用box-Behnken design(BBD)的试验设计方法，此方法适用于2～5个因素的优化实验[13，14]。响应面试验的因素水平表见表1，其中污泥含量A、成型压力B、含水率C、秸秆粒径D为影响因素，抗压强度为响应面值。采用最小二乘法拟合二次多项式方程，同时设置5个中点条件，这样有助于估计模型拟合误差和二次项系数。当模型拟合误差显著时，可以确定二次回归方程，再预测优化工艺结果，然后利用软件DesignExpert8.0绘制出四种因素交互影响的等高线图和响应面3D曲面图，分析得到软件理论值，与预测值对比，从而确定成型的最优参数组合。

表1　响应面试验的因素水平表

Table 1　Factor and levels of response surface method

因素	代码	水平		
		－1	0	1
污泥含量/%	*A*	5	15	25
成型压力/kN	*B*	40	60	80
含水率/%	*C*	5	10	15
秸秆粒径/mm	*D*	＜1	1～2	2～3

1.5成型工艺参数测定

1.5.1试样参数测定

先用小型粉碎机对两种原料进行粉碎处理，再用筛网筛分出粒径分别为＜1mm、1～2mm和2～3mm的油菜秸秆和粒径＜0.2mm的造纸污泥。用烘箱将两种原料烘至绝干，然后将绝干的油菜秸秆和造纸污泥按比例混合后进行配水处理，最后得到平均含水率分别为5%、10%、15%的物料，放入密封袋静置24h备用，以让水分与原料得到充分混合。

1.5.2抗压强度测定

机械性能是衡量成型燃料物理性能的重要指标之一，而抗压强度则是评价机械强度的方法之一。因此本试验测试抗压强度作为评判油菜秸秆新型成型燃料物理性能的方法。首先将5g试样倒入自制的圆柱形模具中，再将模具放到全自动压力试验机上，用电脑控制成型压力与压制速度，压完保压10min后再取出成型燃料。成型燃料需放置三天再测试抗压强度，因为燃料内部会有一部分弹性势能释放从而产生一定的松弛[15]。将静置3d后的成型燃料放于力学试验机上，用电脑控制向燃料进行轴向加压直至破裂，以测试成型燃料的抗压强度。

2结果与分析

2.1响应面试验结果

根据响应面法试验方案进行试验，测定油菜秸秆新型成型燃料在不同条件下的抗压强度，试验结果如表2所示。试验点共有29个，其中最后五个试验点为中心点，以估算试验误差。

表 2　成型工艺参数的响应面试验结果

Table 2　The response surface test results of molding process parameters

序号	因素水平				Y:抗压强度/kN
	A:污泥含量	B:成型压力	C:含水率	D:秸秆粒径	
1	−1	−1	0	0	0.058
2	1	−1	0	0	0.061
3	−1	1	0	0	0.120
4	1	1	0	0	0.147
5	0	0	−1	−1	0.092
6	0	0	1	−1	0.154
7	0	0	−1	1	0.094
8	0	0	1	1	0.119
9	−1	0	0	−1	0.093
10	1	0	0	−1	0.097
11	−1	0	0	1	0.086
12	1	0	0	1	0.089
13	0	−1	−1	0	0.063
14	0	1	−1	0	0.132
15	0	−1	1	0	0.087
16	0	1	1	0	0.149
17	−1	0	−1	0	0.091
18	1	0	−1	0	0.092
19	−1	0	1	0	0.097
20	1	0	1	0	0.124
21	0	−1	0	−1	0.082
22	0	1	0	−1	0.158
23	0	−1	0	1	0.076
24	0	1	0	1	0.110
25	0	0	0	0	0.098
26	0	0	0	0	0.096
27	0	0	0	0	0.086
28	0	0	0	0	0.091
29	0	0	0	0	0.083

利用软件Design Expert 8.0对数据进行分析，可得到二次多项方程对抗压强度指标的二次多项回归拟合方程。抗压强度的二元回归方程响应面模型为$Y=0.091+5.417\times10^{-3}A+0.032B+0.014C-8.5\times10^{-3}D+6\times10^{-3}AB+6.5\times10^{-3}AC-2.5\times10^{-4}AD-1.75\times10^{-3}BC-0.01BD-9.25\times10^{-3}CD-3.983\times10^{-3}A^2+7.017\times10^{-3}B^2+0.013C^2+7.892\times10^{-3}D^2$。

将四种因素处于水平范围的数值代入上述模型，即可得到该种条件下的新型油菜秸秆成型燃料的抗压强度。

2.3方差分析

表3　抗压强度的方差分析

Table 3　Variance analysis of compressive strength

方差来源	平方和	自由度	均方	F 值	P 值
模型	0.019	14	1.366×10^{-3}	16.62	<0.000 1
A	3.521×10^{-4}	1	3.521×10^{-4}	4.28	0.057 4
B	0.013	1	0.013	153.46	<0.000 1
C	2.296×10^{-3}	1	2.296×10^{-3}	27.95	0.000 1
D	8.67×10^{-4}	1	8.67×10^{-4}	10.55	0.005 8
AB	1.44×10^{-4}	1	1.44×10^{-4}	1.75	0.206 8
AC	1.69×10^{-4}	1	1.69×10^{-4}	2.06	0.173 5
AD	2.5×10^{-7}	1	2.5×10^{-7}	3.042×10^{-3}	0.956 8
BC	1.225×10^{-5}	1	1.225×10^{-5}	0.15	0.705 2
BD	4.41×10^{-4}	1	4.41×10^{-4}	5.37	0.036 2
CD	3.422×10^{-4}	1	3.422×10^{-4}	4.17	0.060 6
A^2	1.029×10^{-4}	1	1.029×10^{-4}	1.25	0.281 9
B^2	3.194×10^{-4}	1	3.194×10^{-4}	3.89	0.068 8
C^2	1.163×10^{-3}	1	1.163×10^{-3}	14.16	0.002 1
D^2	4.04×10^{-4}	1	4.04×10^{4}	4.92	0.043 7
残差	1.15×10^{-3}	14	8.217×10^{-5}		
失拟项	9.876×10^{4}	10	9.876×10^{-5}	2.43	0.203 8
纯误差	1.628×10^{4}	4	4.07×10^{5}		
总变异	0.02	28			
$R^2=0.943\ 2$		$R^2_{Adj}=0.886\ 5$		$CV=8.99\%$	

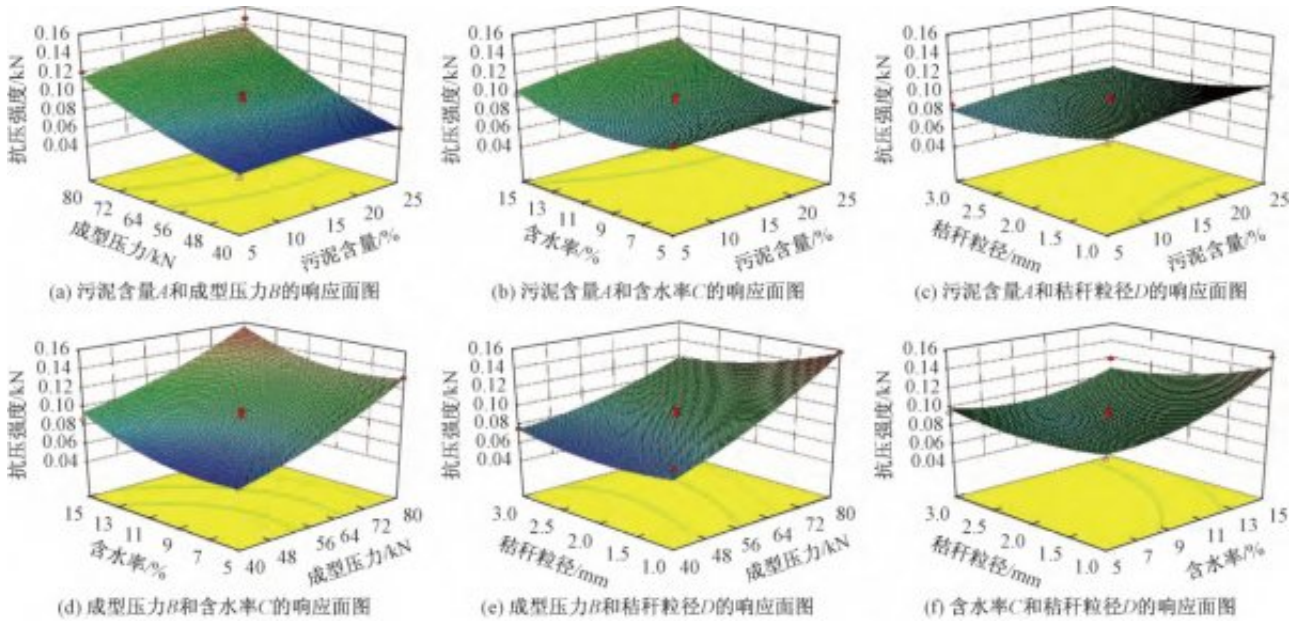
从表3可以看出，模型的P值小于0.05，是显著的，失拟项的P值大于0.05，是不显著的，说明该模型拟合程度较好，对试验结果的分析具有意义。

成型压力B、含水率C、秸秆粒径D这三个因素的P值都小于0.05，表明这三个因素对油菜秸秆新型成型燃料的影响

是显著的。因素污泥含量A的P值接近于0.05，说明造纸污泥作为黏结剂，在一定程度上对成型燃料的抗压强度有一定的影响。因此，这四种因素对抗压强度的影响主次顺序为成型压力B＞含水率C＞秸秆粒径D＞污泥含量A。

2.4响应面分析

由软件Design Expert 8.0可以得到图1，图1是当两个因素为中心水平时，剩余两个因素对抗压强度影响的3D曲面图。分析图1可知，六个曲面都有一定的坡度，并不是规则的平面，表明这四种因素之间是存在两两交互作用的。结合表3可知，两两因素交互作用中，污泥含量和成型压力的P值最小，说明这两因素之间的交互作用最明显，而图1(a)的曲面较为陡峭也表明了较为明显的交互作用。污泥含量和秸秆粒径的P值最大，交互作用最弱，图1(c)的曲面也体现为较为平缓。



(a) 污泥含量A和成型压力B的响应面图　(b) 污泥含量A和含水率C的响应面图　(c) 污泥含量A和秸秆粒径D的响应面图

(d) 成型压力B和含水率C的响应面图　(e) 成型压力B和秸秆粒径D的响应面图　(f) 含水率C和秸秆粒径D的响应面图

图1　四种因素对抗压强度交互作用的响应面图

Fig. 1　Response surface diagram of four factors against compressive strength interaction

在图1(a)中，随着成型压力和污泥含量的增加，成型燃料的抗压强度增加也越明显，但当成型压力较低时，污泥含量对抗压强度的增幅效果较小。在图1(b)中，随着含水率和污泥含量的增加，成型燃料的抗压强度也增加，当污泥含量一定时，含水率对抗压强度的影响幅度呈现先平缓后增大再平缓的抛物线趋势。在图1(c)中，污泥含量和秸秆粒径的交互作用不明显，但是仍能观察出在秸秆粒径最小、污泥含量最大时，抗压强度达到最优值。在图1(d)中，随着成型压力和含水率的增加，抗压强度增加的幅度特别明显，当二者达到最大值时，即成型压力为80kN，含水率为15%时，抗压强度最大。在图1(e)中，随着秸秆粒径的增加，抗压强度减小，随着成型压力的增大，抗压强度增加，当B=80、D=1时(即成型压力为80kN、秸秆粒径＜1mm)，抗压强度最大。在图1(f)中，随着秸秆粒径的增加，抗压强度减小，随着含水率的增大，抗压强度增加，当C=15、D=1时(即含水率为15%、秸秆粒径＜1mm)，抗压强度最大。

2.5优化工艺

Design Expert 8.0软件中分析出的最优值是：当污泥含量为25%，成型压力为80kN，含水率为15%，秸秆粒径＜1mm时，抗压强度可达0.206kN。软件分析预测出的最优值所需四种因素的条件与响应面图分析出的结果一致。

根据上述四种因素的条件进行五组试样测试，测出抗压强度的平均值为0.196kN，与软件分析的最优值的误差极小，所以此模型用于新型油菜秸秆抗压强度的计算是可靠的。

3结果与讨论

本试验在油菜秸秆中加入造纸污泥作为黏结剂制成新型油菜秸秆成型燃料，运用响应面法分析了四种因素(污泥含量、成型压力、含水率和秸秆粒径)对成型燃料抗压性能的影响，分析出四种因素的影响主次顺序为：成型压力＞含水率＞秸秆粒径＞污泥含量，预测到的最优值工艺参数为：当污泥含量为25%，成型压力为80kN，含水率为15%，秸秆粒径为＜1mm时，抗压强度可达0.206kN。

由于试验条件和分析量所致，本试验未考虑造纸污泥粒径这一影响因素，可在后续试验中加入这一影响因素，以精确新型油菜秸秆成型燃料抗压强度的二元回归方程响应面模型。

参 考 文 献

1 张蓓蓓，马 颖，耿 维，等. 中国油菜秸秆资源的生物质能源利用潜力评价[J]. 可再生能源，2017，35(1):126-134
Zhang Beibei, Ma Ying, Geng Wei, et al. Assessment of rape straw resources for biomass energy production in China[J]. Renewable Energy Resources, 2017, 35(1):126-134

2 王汉中. 我国油菜产业发展的历史回顾与展望[J]. 中国油料作物学报，2010，32(2):300-302
Wang Hanzhong. Review and future development of rapeseed industry

in China [J]. Chinese Journal of Oil Crop Sciences, 2010, 32(2): 300-302

3 马秋林，韩鲁佳，黄光群. 油菜秸秆燃烧特性及其主要气体产物表征分析 [J]. 农业机械学报，2014(增刊1):196-201
Ma Qiulin, Han Lujia, Huang Guangqun. Quantitative characterization of rape straw combustion and gas emissions using TG/DSC-FTIR-MS technology [J]. Journal of Agricultural Machinery, 2014(S1): 196-201

4 刘延春，张英楠，刘　明，等. 生物质固化成型技术研究进展 [J]. 世界林业研究，2008，21(4):41-47
Liu Yanchun, Zhang Yingnan, Liu Ming, et al. Reviews on solidification technology of biomass [J]. World Forestry Research, 2008, 21(4):41-47

5 Rahaman S A, Salam P A. Characterization of cold densified rice straw briquettes and the potential use of sawdust as binder [J]. Fuel Processing Technology, 2017, 158(Complete):9-19

6 蒋龙波. 城市污泥与典型生物质的混合成型行为及机理研究 [D]. 长沙:湖南大学，2015
Jiang Longbo. Characteristics and mechanisms study on co-pelletization of sewage sluge and typical biomass [D]. Changsha:Hunan University, 2015

7 姜秋玥. 玉米秸秆混污泥燃料成型及其燃烧特性研究 [D]. 锦州:辽宁工业大学，2016
Jiang Qiuyue. Research on forming and combustion characteristics of fuel made by corn stalks and sludge [D]. Jinzhou:Liaoning Unversity of Technology, 2016

8 王爱民，白　妮，孙志勇，等. 城市污泥作为型焦粘结剂的工艺及机理研究 [J]. 硅酸盐通报，2016，35(11):3664-3668
Wang Aimin, Bai Ni, Sun Zhiyong, et al. Technology and mechanism of municipal sludge as formed coke binder [J]. Bulletin of the Chinese Ceramic Society, 2016, 35(11):3664-3668

9 李婷婷，黄艳琴，刘华财，等. 造纸污泥添加剂对麦秆灰烧结熔融特性的影响 [J]. 燃料化学学报，2017，45(11):1323-1331
Li Tingting, Huang Yanqin, Liu Huacai, et al. Effects of paper mill residual additives on sintering and melting characteristic of wheat straw [J]. Journel of Fuel Chemistry and Technology, 2017, 45(11):1323-1331

10 赵培涛，葛仕福，张长飞，等. 污泥及秸秆生物质固体燃料制备中试工艺及燃烧特性 [J]. 农业工程学报，2012，28(9):165-170
Zhao Peitao, Ge Shifu, Zhang Changfei, et al. Pilot process and combustion characteristics of sludge-straw derived solid biofuel [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2012, 28(9):165-170

11 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
Xu Deyu, Li Anxin, He Guisheng. Parameter optimization of rice straw cold press process [J]. Journal of Agricultural Science and Technology, 2015, 17(3):56-62

12 张百良，王许涛，杨世关. 秸秆成型燃料生产应用的关键问题探讨 [J]. 农业工程学报，2008，24(7):296-300
Zhang Bailiang, Wang Xutao, Yang Shiguan. Key problems in production and application of straw densification briquetting fuel [J]. Transactions of the CSAE, 2008, 24(7):296-300

13 Ren W X, Chen H B. Finite element model updating in structural

dynamics by using the response surface method [J]. Engineering Structures, 2010, 32(8): 2455-2465

14 李 莉, 张 赛, 何 强, 等. 响应面法在试验设计与优化中的应用 [J]. 实验室研究与探索, 2015, 34(8): 41-45
Li Li, Zhang Sai, He Qiang, et al. Application of response surface methodology in experiment design and optimization [J]. Research and Exploration in Laboratory, 2015, 34(8): 41-45

15 Zhang X, Peng W, Han L, et al. Effects of different pretreatments on compression molding of wheat straw and mechanism analysis [J]. Bioresour Technol, 2017, 251:210-217

原文地址：http://www.china-nengyuan.com/tech/169278.html