

复合粘结剂对生物质成型颗粒密度与能耗的影响

蔡 键^{1,2}, 司耀辉², 邵敬爱², 米 铁¹, 张世红², 陈汉平²

(1. 江汉大学工业烟尘污染控制湖北省重点实验室, 武汉 430056; 2. 华中科技大学煤燃烧国家重点实验室, 武汉 430074)

摘 要: 以棉秆、麦秆和油菜秆为原料,通过向其中加入不同的复合粘结剂于台式模压单元上进行成型实验来考察生物质成型颗粒的特性。结果发现,对于棉秆和麦秆而言,加入粘结剂后的成型颗粒比未添加粘结剂的成型颗粒的松弛密度大幅提高,并且能耗减少20%以上。综合考虑成型颗粒品质、能耗以及经济成本等因素,棉秆和麦秆成型颗粒的最优复合粘结剂(羧甲基纤维素、 Al_2O_3 、 Fe_2O_3 和黏土)的质量比分别为4:4:5:7和3:5:6:6,而油菜秆由于自身特性,需进一步探讨其最佳成型方式。通过红外光谱和金相显微镜图像分析,粘结剂中的羧甲基纤维素与成型颗粒中微小粒子相互交联形成“桥键”加强原料粒子间的粘结力,但由于油菜秆中提取物含量较高,导致原料粒子表面形成的角质层阻碍粘结剂与原料粒子之间的相互作用。

关键词: 生物质; 成型颗粒; 能耗; 复合粘结剂; 桥键

中图分类号: TK16

文献标志码: A

0 引 言

生物质作为一种近似零排放的清洁能源,吸引了各界的广泛关注^[1-3]。中国年产8.46亿t的农业废弃物^[4],其潜在能量巨大,但由于秸秆具有能量密度低、堆积密度低、水分含量高、形状和尺寸不规则以及燃烧不稳定等缺点,使其不易储存和运输。近年来,将生物质原料粉碎后压制成型颗粒或团块的成型技术发展迅速^[5-11],这种方法得到固化致密的产品不仅可使用标准过程和储存设备进行处理,而且便于热解、气化、直接燃烧或与煤混烧而进一步利用^[12-14]。

国内外学者对生物质原料获得最佳品质的成型条件进行了较多试验研究。李坤等^[4]研究了发现,对所有木质类生物质来说,成型所必需的水分含量在5%~12%之间,最佳含水量约为8%。李亚东等^[15]发现含水量为5%~20%,压力为70 MPa以下时,废纸混合物较易压制成品质良好的成型颗粒。Stelte等^[16]研究温度对生物质颗粒成型的影响,结果表明当成型温度达到100℃时,相应成型颗粒具有较大的机械强度和粘结力。Chou等^[3]利用活塞模具压制3种不同粒径的生物质,发现当粒径小于2 mm时,生物质压块品质最好。Yumak等^[17]经试验得到生物质原料最佳压制条件为含水率7%~10%,压力31.4 MPa,温度85~105℃。李大中

等^[18]指出当含水率为6.6%,成型温度为140.9℃时,稻壳成型燃料的松弛密度达最大值1.28 g/cm³。

上述研究大多利用生物质材料中天然的黏合物,如淀粉、蛋白质、木质素和果胶等化学成分在较大压力和加热条件下转换为粘结剂^[19]来提升成型品质,很少考虑在成型过程中加入成本较低且效果良好的粘结剂。另一方面,秸秆成型燃料由于在燃烧过程易出现严重的结渣现象^[20],工业上常使用在成型物料内加入粘结剂(木质素磺酸钙、膨润土和石灰等)的办法解决这一问题^[21]。鉴于此,本文采用常见的农业废弃物(棉秆、麦秆和油菜秆),并添加羧甲基纤维素(CMC)、 Al_2O_3 、 Fe_2O_3 和黏土制得复合型粘结剂,考察粘结剂对秸秆成型的影响,以期对秸秆生物质利用技术的开发提供科学参考。

1 实验样品与实验方法

1.1 实验样品及粘结剂

生物质样品选用3种典型的农业秸秆,包括棉秆、麦秆和油菜秆。生物质原料经研磨、筛分后取颗粒小于0.3 mm的样品,然后放置于105℃的干燥箱中干燥24 h。生物质样品的工业分析和元素分析分别采用工业分析仪(西班牙Las Navas公司,型号:SDTGA-2000)

收稿日期: 2017-10-16

基金项目: 国家自然科学基金(51876077; 51476067); 江汉大学开放课题(HBIK2016-02)

通信作者: 陈汉平(1962—), 男, 博士、教授, 主要从事固体燃料高效转化和利用方面的研究。fbghust@163.com

和元素分析仪(德国 Vario 公司,型号:EL-2)进行分析;发热量采用自动量热仪(美国 Parr 公司,型号:Parr 6300)进行测定。分析结果见表 1。

采用范氏(Van Soest)的洗涤纤维分析法^[22]对生物质原料的有机组成进行分析。通过硫酸水解载有

样品的苯乙醇混合物来测定生物质中酸不溶性的木质素含量,生物质中的纤维素和半纤维素含量则利用范氏酸性洗涤法测量^[23]。而对于提取物的测量,采用有机溶剂乙醚来提取样品,然后烘干并称重提取物。

表1 秸秆样品的元素、工业分析和组分分析

Table 1 Ultimate analysis, proximate analysis, and component analysis of straw samples

样品	元素分析 ^d /% ,wt					工业分析 ^d /% ,wt			HHV/ MJ·kg ⁻¹	组分分析/% ,wt			
	[C]	[H]	[N]	[S]	[O]*	灰分 A	固定碳 FC	挥发分 V		纤维素	半纤维素	木质素	提取物 含量
棉秆	47.43 (1.93)	6.65 (0.16)	1.21 (0.39)	0.36 (0.07)	39.53 (1.30)	4.82 (0.75)	16.57 (0.11)	78.61 (0.86)	17.94	37.49 (1.97)	22.80 (3.99)	26.92 (0.24)	2.81 (0.22)
麦秆	42.33 (2.54)	6.24 (0.31)	0.58 (0.21)	0.28 (0.05)	37.07 (1.92)	13.50 (1.09)	14.85 (0.52)	71.65 (1.61)	15.62	33.73 (2.60)	32.74 (2.68)	17.60 (0.14)	8.31 (0.71)
油菜秆	47.06 (1.43)	6.92 (0.13)	0.86 (0.14)	0.21 (0.18)	38.31 (0.98)	6.63 (0.11)	14.74 (0.99)	78.63 (1.45)	16.71	37.23 (1.67)	23.47 (2.72)	14.13 (0.84)	10.67 (1.46)

注:O*含量由差减法计算得到,d为干燥基。

复合型粘结剂由羧甲基纤维素、Al₂O₃、Fe₂O₃和黏土 4 种物质按不同质量比例混合而成。复合粘结剂中的后 3 种物质主要是考察粘结剂对后续燃烧中积灰结渣的影响,故其对生物质成型过程中粘结特性的影响本文暂不予考虑。为成型实验的严谨性,本文仍将复合粘结剂各组分比例列出,粘结剂 1、粘结 2、粘结剂 3 中的比例依次是 2:3:7:8、3:5:6:6、4:4:5:7,且 4 种组分总质量为 0.2 g。

1.2 秸秆成型颗粒物理特性

1.2.1 成型颗粒密度

生物质成型颗粒的密度被分为初始密度(ρ_i)和松弛密度(ρ_r)2 类^[24]。ρ_i是生物质成型颗粒在挤压完成 5 min 后测得的密度,ρ_r是成型颗粒放置 7 d 后测得的密度。2 种颗粒的密度由式(1)计算得到。

ρ = m / (πr²l) (1)

式中,ρ——成型颗粒密度,kg/m³; m——颗粒质量,g; r——半径,mm; l——高度,mm。

1.2.2 能 耗

在生物质成型燃料产业中,能耗是影响生物质成型燃料发展的决定性因素之一。在成型颗粒生产过程中,有多种因素会(如温度、摩擦力、压力和模具等)对能耗产生较大影响。由于实验在室温下进行,温度因素可忽略,本文主要从压力等方面入手,计算冷态成型压缩的最优条件下的成型能耗,如式(2)。

W = ∑_{i=1}^n F_i × S_i (2)

式中,W——成型能耗,J; F_i——成型压力,N; S_i——位移,m。

1.3 成型实验及方法

实验装置如图 1 所示,成型设备主要有微控制电子材料试验机(WDW3200);直径为 20.5 mm 和长度为 80 mm 的套筒;直径为 20 mm,长度为 71 mm 的挤压活塞以及 2 个直径为 20 mm 和长度为 9 mm 的不锈钢垫片。挤压实验前,将生物质原料与粘结剂以 19:1 的比例混合(3.8 g 生物质原料和 0.2 g 粘合剂),并利用电

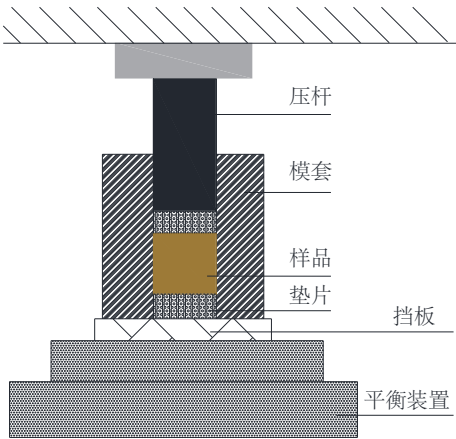


图1 实验装置的示意图:压力机上不锈钢模具
Fig. 1 Experiment device schematic diagram: stainless steel module on press machine

磁搅拌器均匀搅拌 24 h,混合均匀后,加入水至水的质量分数为 18%并放置 48 h,然后将调制好的混合原料放入挤压套筒中,压杆以 20 mm/min 的速率行进,当达到规定的挤压位置时,保持压力 30 s,最后对成型颗粒进行脱模,实验完成或更换实验原料时,用丙酮清洗模具,并擦拭干净。

1.4 全反射傅里叶红外测定和金相显微镜分析

室温下使用全反射傅里叶变换红外光谱仪(VERTEX70,德国)记录成型颗粒表面的红外光谱。在实验中,用金属棒对成型颗粒表面施加一定压力,以便获得最好的实验结果。每个样本进行 2 次测试,每个光谱对背景(空气)进行 100 次分辨率为 4 cm^{-1} 扫描。

采用金相显微镜(Axiovert200MAT,德国)对成型颗粒的横截面进行扫描分析。为了获得最好的图像效果和保护显微镜镜头,成型颗粒表面必须非常光滑、平坦,并且不掉粉末,每个样品图像采集 5 次并放大至 $500\text{ }\mu\text{m}$ 以观察相邻颗粒之间的结构。

2 结果与讨论

2.1 原料特性

生物质原料的挥发分、灰分、固定碳含量和高位发热量都满足成型颗粒商业产品的要求^[25-26],表明这些生物质原料可用于生物燃料的商业生产。从表 1 可看出,棉秆具有较高的固定碳含量,所以其发热量比油菜秆和麦秆高,并且棉秆的木质素含量也相对较高。由于选用的棉秆、麦秆和油菜秆来自于农业废弃物,硫含量相比大部分动力煤(0.6%~2.0%)低得多(<0.6%),此外这些生物质样品灰分含量(<13%)也比动力煤的灰分含量少,特别是棉秆的灰分含量仅为 4.82%。

从内在性质来考虑这 3 种生物质样品的实验结果,棉秆的纤维素和木质素含量最高,材质较硬,表现出与木本类材料类似的性质。麦秆的半纤维素含量最高。油菜秆的提取物含量最高,但木质素含量最低。表明生物质材料性质的差异可能对其制粒和利用产生影响。

2.2 秸秆成型原料物理特性

2.2.1 粘结剂对成型颗粒密度的影响

压缩密度是评价生物质成型颗粒的一个重要参数。压缩密度越高,成型品质越好。目前,商业成型颗粒的密度一般为 $1030\sim 1300\text{ kg/m}^3$ ^[27-28]。由于羧甲基纤维素中含有大量长纤维,能为桥键的形成提供基础,所以从压缩装置中挤压出来的成型颗粒的成型压力低于 70 MPa。实验中实时的压缩密度与成型压力关系如

图 2a~图 2c 所示。

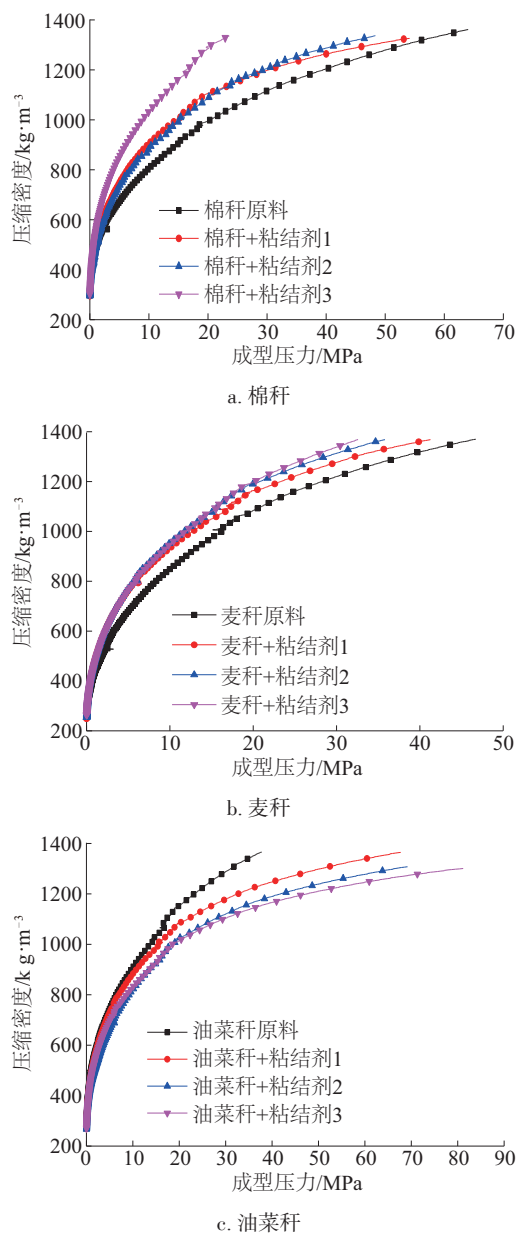


图 2 生物质的成型压力和压缩密度曲线图

Fig. 2 Pressure and compression density curve of biomass

从图 2a 和图 2b 可看出,在棉秆和麦秆挤压实验中,3 种粘结剂均起到良好的粘结作用,在压缩密度相同的情况下,加入粘结剂所需的成型压力远低于未加入粘结剂的棉秆颗粒和麦秆颗粒,并且在成型压力低于 50 MPa 时,其压缩密度接近木材细胞壁密度 $1400\sim 1500\text{ kg/m}^3$ ^[29]。因此可推断,粘结剂中的羧甲基纤维素能有效减小颗粒之间的距离,提高相邻粒子之间的吸引力,从而达到降低成型压力的目的。但在图 2c 中,3 种不同的粘结剂在成型压力低于 20 MPa 时,对油菜秆压

缩成型的影响较小,但在压强高于 20 MPa 后,为达到与未使用粘结剂相同的压缩密度,所需压力大幅增加,初步推断可能与油菜秆内含有大量蜡和较少木质素有关。

成型颗粒的初始压缩密度(ρ_i)和松弛密度(ρ_r)如表 2 所示。添加粘结剂的生物质成型颗粒的 ρ_i 全部满足商业成型颗粒标准的压缩密度(1030 kg/m³),但挤压成型的颗粒放置 7 d 后,油菜秆颗粒的结构变得松散, ρ_r 降至 810~970 kg/m³,远低于其他 2 种生物质颗粒的松弛密度(1115~1137 kg/m³和 1095~1117 kg/m³)。

表 2 生物质成型颗粒的初始压缩密度和松弛密度
Table 2 Initial compression density and relaxation density of biomass pellet

样品	初始压缩密度 $\rho_i/\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$	松弛密度 $\rho_r/\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$
棉秆原料	1361	1115
棉秆+粘结剂 1	1327	1124
棉秆+粘结剂 2	1337	1131
棉秆+粘结剂 3	1336	1137
麦秆原料	1369	1095
麦秆+粘结剂 1	1369	1101
麦秆+粘结剂 2	1368	1115
麦秆+粘结剂 3	1368	1117
油菜秆原料	1366	970
油菜秆+粘结剂 1	1364	832
油菜秆+粘结剂 2	1307	826
油菜秆+粘结剂 3	1300	810

2.2.2 粘结剂对成型能耗的影响

生物质成型颗粒在压缩试验过程中的能量消耗如表 3 所示。由于添加粘结剂,制成的棉秆和麦秆成型颗粒的成型能耗比未添加粘结剂时大幅减少,其中棉秆降低 3%~33%,麦秆降低 23%~29%。这意味着,加入粘结剂的棉秆和麦秆制成的成型颗粒,不仅能提高能源利用效率,而且能降低生产成本。随着粘结剂含量的升高,小麦的成型能耗降低有限,因此对麦秆而言,选择合适的粘结剂含量尤为重要。但是,加入粘结剂的油菜秆压缩制成的成型颗粒的成型能耗却大大增加(28%~49%),这可能是因为,油菜秆所富含的蜡使油菜秆粒子内聚力变低以及粘结强度变差,同时,在加入粘结剂后,相邻颗粒之间未产生桥键,而且低含量的木质素也可能削弱粒子间的粘合强度^[16]。

表 3 添加粘结剂与未添加粘结剂生物质的成型能耗
Table 3 Forming energy consumption of biomass with and without binder

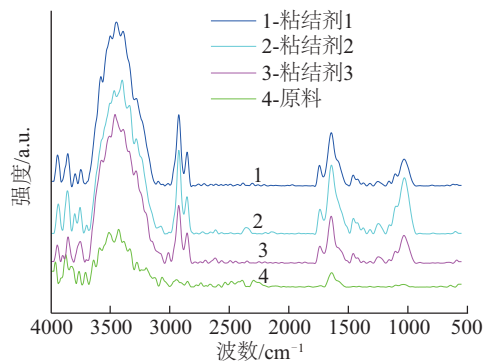
样品	原料	原料+ 粘结剂 1	原料+ 粘结剂 2	原料+ 粘结剂 3
棉秆	72.14	69.45	50.52	48.25
麦秆	60.67	46.74	43.29	43.05
油菜秆	46.31	59.69	64.82	68.78

结合粘结剂对压缩密度的影响,优先考虑不同条件下的成型能耗,然后考虑密度和粘结剂的加入量来进行最优成型条件选择。因此对于棉秆,由于加入粘结剂 3,成型能耗最小,松弛密度最大,同时在成型压力为 23.6 MPa 条件下,压缩密度最大,故为最优成型条件;对于麦秆,由于加入粘结剂 2 和粘结剂 3 后成型能耗都较小,且相差不大,同时松弛密度均较大且相差不大,因此考虑粘结剂 2 对 CMC 的用量少,且在压力为 32.6 MPa 时压缩密度最大,故为最优成型条件。对于油菜秆,不加粘结剂为最优成型条件。

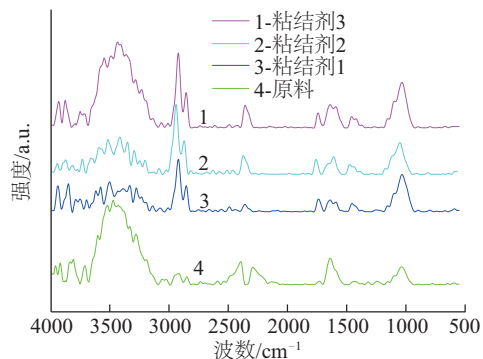
2.2.3 粘结剂对成型颗粒表面特性的影响

生物质冷态成型过程中,成型压力相对于热态成型的成型压力大,在成型过程中,成型颗粒表面会产生巨大的摩擦力,并因此产生大量热量,从而使粘结剂与生物质原料产生一定程度的物理及化学结构变化^[30],因此有必要对成型后的成型颗粒表面进行红外分析。生物质成型颗粒表面红外光谱图如图 3 所示。从图 3 可看出,在 2850 cm⁻¹ 和 2920 cm⁻¹ 处,加入粘结剂和未加入粘结剂的成型颗粒表面有所不同,而此峰段,主要是 C—H 键(尤其是一CH₂)的延伸,意味着成型颗粒表面出现了疏水性提取物(如蜡和油)^[31]。由此可推测,在加入粘结剂后,成型后的生物质颗粒表面覆盖了一层含有丰富低分子量蜡的角质层^[32]。但在未添加粘结剂的生物质成型颗粒表面未观察到烷基 C—H 伸缩振动带,而加入粘结剂的成型颗粒的表面都能看到 C—H 伸缩振动带,这是因为在压缩过程中,生物质原料内部的油脂和蜡迁移至生物质成型颗粒的表面。一般可认为在压缩过程中,富含低分子量烃的提取物(如油脂和蜡),可减少原料和模具之间的摩擦力,从而降低成型能耗和所需的成型压力。而且,加入粘结剂 2 的棉秆颗粒的 C—H 伸缩振动带比加入其他 2 种粘结剂的棉秆颗粒高一个数量级,而其他加入粘结剂的生物质成型颗粒的 C—H 伸缩振动谱带基本在一个数量级。同时,而 1050 cm⁻¹ 处所示的纤维素分子的部分糖苷键的峰强度

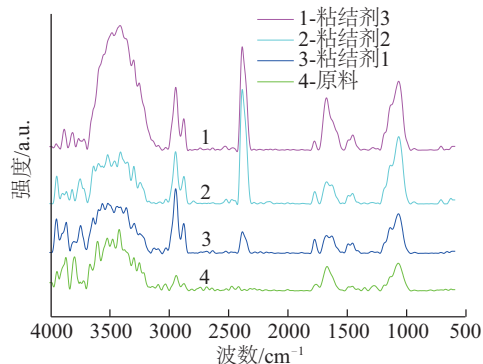
明显增加,说明羧甲基纤维素明显对成型压缩起到一定作用。另外,由于羧甲基纤维素含有大量羟基,易吸收空气水分,而麦秆和油菜秆在加入低含量羧甲基纤维进行成型时,粘结剂主要用于成型的粘结作用,但当其含量较高时,成型颗粒吸水性也相应增强,图 3b 和图 3c 中 3500 cm^{-1} 的峰强度也证明了这一点。



a. 棉秆



b. 麦秆



c. 油菜秆

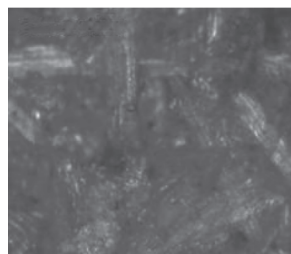
图3 棉秆、麦秆、油菜秆成型颗粒表面红外光谱图

Fig. 3 Surface infrared spectrogram of cotton stalk, wheat straw, rape straw pellet

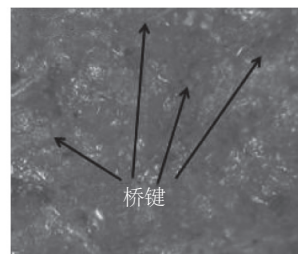
2.3 加入粘结剂的成型颗粒的粘结机理

根据棉秆颗粒和麦秆颗粒的压缩密度和成型能耗

分析,在加入含有不同比例羧甲基纤维素的粘结剂后,棉秆和麦秆的成型颗粒品质有很大提升,棉秆和麦秆成型得到相同压缩密度所需的成型压力大幅降低(图 2a 和图 2b)并且成型能耗有所下降(表 3)。未加粘结剂与加入粘结剂成型后得到的棉秆和麦秆成型颗粒的金相显微镜图像如图 4a 图 4d 所示,可看出加入粘结剂成型后其颗粒表面变得光滑平整,成型颗粒粒子间的距离很小,且未出现回弹现象,这表明成型颗粒中的粒子间隙和空隙减少,相邻颗粒之间具有良好的粘附性。同时可看到横截面上的长纤维相互缠绕,形成机械嵌合(但在图 4f 中并未发现这种现象)。这是因为在加入粘结剂后,生物质粒子通过扩散从一处迁移到另一处,并在接触点形成桥键。结合全反射傅里叶红外光谱分析可推断,添加在粘结剂中的羧甲基纤维素使得生物质原料相邻粒子之间相互吸引并且形成桥键,导致小粒子被捕获并连接形成桥键,相邻粒子之间形成较大的粘合力^[33]。



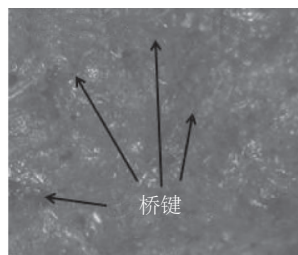
a. 棉秆



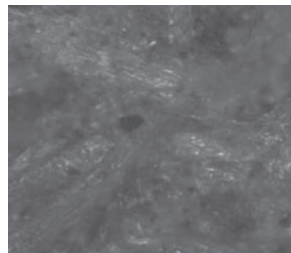
b. 加入粘结剂的棉秆颗粒



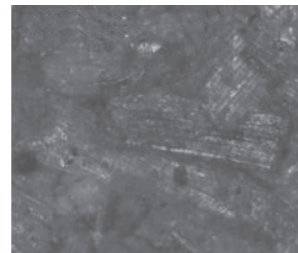
c. 麦秆



d. 加入粘结剂的麦秆颗粒



e. 油菜秆颗粒



f. 加入粘结剂的油菜秆颗粒

图4 棉秆、麦秆、油菜秆颗粒的金相显微镜图像(放大到500 μm)

Fig. 4 Metallographic microscope images of cotton stalk, wheat straw, rape straw pellet (zoom to 500 microns)

未加粘结剂与加入粘结剂成型后得到的油菜秆成型颗粒的金相显微镜图像如图 4e 和图 4f 所示,可看出,油菜秆颗粒表面粒子之间并未形成桥键。这可能是由于油菜秆木质素含量低,蜡含量高,并且这些因素都不利于形成桥键,在这种情况下,氢键和范德华力起主要的粘结作用^[16],而角质层中的蜡会阻碍原料粒子之间的氢键结合,导致成型颗粒粘结力降低(因此需要更高的挤压力来保证其成型),其原因一是蜡质层的存在使蜡质层与颗粒之间的范德华力降低,二是蜡质层较厚,使其内聚破坏(表面本身上的弱蜡质层)效果更强。而油菜秆的提取物含量较高,明显属于后者。根据以上描述,提取物中的蜡虽可减少原料和模具之间的摩擦力,但当其含量较高时,却降低了生物质成型颗粒粒子间的粘结强度,这与文献[16]结论一致。

3 结 论

在微控制电子材料试验机上研究加入含有羧甲基纤维素(CMC)的不同粘结剂对 3 种农业废弃物(棉秆、麦秆、油菜秆)颗粒成型特性的影响。实验结果表明,在室温条件下,加入粘结剂后棉秆颗粒和麦秆颗粒成型特性和能耗得到较大改善,相较于未加入粘结剂成型的颗粒,其初始压缩密度与松弛密度大幅提高,相应成型能耗减少 20% 以上。这是由于粘结剂中的 CMC 增强生物质原料相邻粒子之间相互作用力并形成桥键。而在加入粘结剂后,油菜秆颗粒成型的初始压缩密度下降,成型能耗提高 28%~49%,这归因于油菜秆本身高含蜡量和低木质素含量等因素,加入粘结剂后,相应相邻颗粒之间的粘附力和范德华力降低。

据实验结果得出在室温、含水率为 18% 的条件下,棉秆成型的最优条件为:粘结剂中 CMC、 Al_2O_3 、 Fe_2O_3 和黏土的质量比 4:4:5:7 和压力 23.6 MPa;麦秆成型的最优条件为:粘结剂中 CMC、 Al_2O_3 、 Fe_2O_3 和黏土的质量比为 3:5:6:6 和压力 32.6 MPa;油菜秆成型的最优条件为:无粘结剂,压力 37.8 MPa。

[参考文献]

- [1] 何玉凤, 钱文珍, 王建凤, 等. 废弃生物质材料的高附加值再利用途径综述[J]. 农业工程学报, 2016, 32(15): 1-8.
HE Y F, QIAN W Z, WANG J F, et al. High value-added reutilization approach for waste biomass materials [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2016, 32(15): 1-8.
- [2] DEMIRBAS A. Combustion characteristics of different biomass fuels [J]. Progress in energy and combustion science, 2004, 30(2): 219-230.
- [3] CHOU C S, LIN S H, PENG C C, et al. The optimum conditions for preparing solid fuel briquette of rice straw by a Piston-Mold process using the Taguchi method [J]. Fuel processing technology, 2009, 90 (7-8): 1041-1046.
- [4] LI K, LIU R H, SUN C. A review of methane production from agricultural residues in China [J]. Renewable & sustainable energy reviews, 2016, 54: 857-865.
- [5] 姜洋, 李伟振, 蒋恩臣, 等. 成型参数对桉树加工剩余物成型颗粒品质影响的实验研究 [J]. 太阳能学报, 2017, 38(4): 900-905.
JIANG Y, LI W Z, JIANG E C, et al. Experimental research of effect of molding parameters on quality of eucalyptus residue pellets [J]. Acta energiae solaris sinica, 2017, 38(4): 900-905.
- [6] 李保谦, 徐光辉. 生物质成型燃料技术的现在与未来 [C]//2014 中国(国际)生物质能源与生物质利用高峰论坛(BBS 2014), 中国, 上海, 2014.
LI B Q, XU G H. Present and future of biomass briquette technology [C]//2014 China International Bioenergy and Biomass Utilization Summit, Shanghai, China, 2014.
- [7] 李英丽, 王建, 程晓天. 生物质成型燃料及其发电技术 [J]. 农机化研究, 2013, 35(6): 226-229.
LI Y L, WANG J, CHENG X T. Biomass briquetting fuel and its applications in power generation technology [J]. Journal of agricultural mechanization research, 2013, 35(6): 226-229.
- [8] 吴云玉, 董玉平, 吴云荣. 生物质固化成型的微观机理 [J]. 太阳能学报, 2011, 32(2): 268-271.
WU Y Y, DONG Y P, WU Y R. Research on micro-mechanism of biomass briquet [J]. Acta energiae solaris sinica, 2011, 32(2): 268-271.
- [9] 邢献军, 李涛, 马培勇, 等. 生物质固体成型燃料热压成型实验研究 [J]. 太阳能学报, 2016, 37(10): 2660-2667.
XING X J, LI T, MA P Y, et al. Experimental study of hot molding of densified biofuel [J]. Acta energiae solaris sinica, 2016, 37(10): 2660-2667.
- [10] 张百良, 任天宝, 徐桂转, 等. 中国固体生物质成型燃料标准体系 [J]. 农业工程学报, 2010, 26(2): 257-262.
ZHANG B L, REN T B, XU G Z, et al. Solid biofuel

- standard system in China[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2010, 26(2): 257-262.
- [11] 张剑波. 生物质成型燃料固定床热解气化研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2013.
ZHANG J B. Experimental study on biomass molding fuel pyrolysis and gasification in fixed beds[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2013.
- [12] 刘俊红, 王革华, 张百良. 生物质成型燃料产业化的理性思考[J]. 农业工程学报, 2006(S1): 138-141.
LIU J H, WANG G H, ZHANG B L. Reasonable thought on the industrialization of straw densification briquette fuel[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2006(S1): 138-141.
- [13] RAVINDRANATH N H, HALL D O. Biomass, energy, and environment: a developing country perspective from India[M]. Oxford: Oxford University Press, 1995.
- [14] COSTELLO R. Biomass cofiring offers cleaner future for coal plants[J]. Power engineering, 1999, 103(1): 45-48.
- [15] LI Y D, LIU H. High-pressure binderless compaction of waste paper to form useful fuel[J]. Fuel processing technology, 2000, 67(1): 11-21.
- [16] STELTE W, HOLM J K, SANADI A R, et al. A study of bonding and failure mechanisms in fuel pellets from different biomass resources [J]. Biomass & bioenergy, 2011, 35(2): 910-918.
- [17] YUMAK H, UCAR T, SEYIDBEKIROGLU N. Briquetting soda weed (*Salsola tragus*) to be used as a rural fuel source [J]. Biomass & bioenergy, 2010, 34(5): 630-636.
- [18] 李大中, 朱文杰. 生物质稻壳压缩成型过程建模及优化[J]. 可再生能源, 2010, 28(5): 124-127.
LI D Z, ZHU W J. Modeling and optimization in the briquetting process of rice husk [J]. Renewable energy resources, 2010, 28(5): 124-127.
- [19] 王民, 郭康权, 朱文荣. 秸秆制作成型燃料的试验研究[J]. 农业工程学报, 1993, 9(1): 99-104.
WANG M, GUO K Q, ZHU W R. A preliminary study on the preparation of pressurized straw briquette[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 1993, 9(1): 99-104.
- [20] 刘圣勇, 李文雅, 苏超杰, 等. 生物质成型燃料燃烧设备结渣特性试验研究[J]. 农业工程学报, 2006, 22(S1): 135-137.
LIU S Y, LI W Y, SU C J, et al. Experimental study on the slagging characteristics of biomass briquette combustion equipment [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2006, 22(S1): 135-137.
- [21] 夏先飞, 武凯, 孙宇, 等. 生物质(秸秆)致密成型技术研究进展[J]. 中国农机化学报, 2013, 34(6): 36-42.
XIA X F, WU K, SUN Y, et al. Research progress of the biomass (straw) densification forming technology [J]. Journal of Chinese agricultural mechanization, 2013, 34(6): 36-42.
- [22] GOERING H K, VAN SOEST P J. Forage fiber analyses (apparatus, reagents, procedures, and some applications) [M]. Washington D C: USDA Agriculture Handbook, 1970.
- [23] BROWNING B L. Methods of wood chemistry [M]. New York: Interscience Publishers, 1967.
- [24] CHIN O C, SIDDIQUI K M. Characteristics of some biomass briquettes prepared under modest die pressures [J]. Biomass & bioenergy, 2000, 18(3): 223-228.
- [25] VERMA V K, BRAM S, DELATTIN F, et al. Agropellets for domestic heating boilers: standard laboratory and real life performance [J]. Applied energy, 2012, 90(1S1): 17-23.
- [26] ERLICH C, FRANSSON T H. Downdraft gasification of pellets made of wood, palm-oil residues respective bagasse: experimental study [J]. Applied energy, 2011, 88(3): 899-908.
- [27] CHRISTOFER R, MARCUS O, GREFF R, et al. Effect of raw material composition in woody biomass pellets on combustion characteristics [J]. Biomass & bioenergy, 2007, 31(1): 66-72.
- [28] OBERNBERGER I, THEK G. Physical characterisation and chemical composition of densified biomass fuels with regard to their combustion behaviour [J]. Biomass & bioenergy, 2004, 27(6): 653-669.
- [29] DINWOODIE J M. Timber: its nature and behaviour [M]. Spon Press, 1981.
- [30] NALLADURAI K, VANCE M R. Constitutive model for densification of corn stover and switchgrass [J]. Biosystems engineering, 2009, 104(1): 47-63.
- [31] MERK S, BLUME A, RIEDERER M. Phase behaviour and crystallinity of plant cuticular waxes studied by Fourier transform infrared spectroscopy [J]. Planta, 1998, 204(1): 44-53.
- [32] STELTE W, HOLM J K, SANADI A R, et al. Fuel pellets from biomass: the importance of the pelletizing pressure and its dependency on the processing conditions [J]. Fuel, 2011, 90(11): 3285-3290.

- [33] BACK E L. The bonding mechanism in hardboard manufacture review report[J]. *Holzforschung-*

international journal of the biology, chemistry, physics and technology of wood, 1987, 41(4): 247-258.

EFFECT OF COMPOSITE BINDERS ON DENSITY AND ENERGY CONSUMPTION OF BIOMASS BRIQUETTES

Cai Jian^{1,2}, Si Yaohui², Shao Jing'ai², Mi Tie¹, Zhang Shihong², Chen Hanping²

(1. *Hubei Key Laboratory of Industrial Fume & Dust Pollution Control, Jiangnan University, Wuhan 430056, China;*

2. *State Key Laboratory of Coal Combustion, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China*)

Abstract: In the paper, cotton stalk, wheat straw and rape straw acted as the material. The biomass pellet properties were investigated by conducting a series of briquetting experiments on a bench top press unit. It was found that the relax density of cotton stalk and wheat straw were increased significantly and the energy consumption was reduced by over 20% compared with that of the briquettes without binder material. The optimal compound binder proportions of cotton stalk and wheat straw were 4:4:5:7 and 3:5:6:6, respectively, considering the pellet quality, energy consumption and economic cost. But the optimal shaping condition of rape straw needs to be further discussed for its special features. Through the infrared spectrum and metallographic microscope image analysis, it was due to carboxymethyl cellulose of binders and tiny particles of the biomass briquette attracted with each other and strengthened interlocking bonds through fabricating "solid bridge". But for rape straw it had high extract content, a layer of cuticle formed on the surface of particles, which hindered the interaction between the binder and raw material particles.

Keywords: biomass; pellets; energy consumption; composite binder; solid bridge