

桉木屑颗粒燃料固体桥结构构建与燃烧特性研究

李伟振^{1,2} 刘华财^{1,3} 姜洋^{1,2} 阴秀丽^{1,2} 许雪楠⁴ 洪浩⁴

(1. 中国科学院广州能源研究所, 广州 510640; 2. 中国科学院可再生能源重点实验室, 广州 510640;
3. 广东省新能源和可再生能源研究开发与应用重点实验室, 广州 510640; 4. 吉林宏日新能源股份有限公司, 长春 130212)

摘要: 在成型燃料内部构建固体桥结构可有效改善其物理品质,利用不同粒径桉木屑构建了具有固体桥结构的颗粒燃料,并进一步研究了颗粒燃料的燃烧特性。提出的构建方法为同种原料不同粒径混配成型,在电子压力机上进行了粒径(0,1 mm]原料混配粒径(4 mm,5 mm]原料的颗粒压缩成型实验,结果显示混配量5%~10%时颗粒内部长粒径粒子的交叉缠绕,可形成适量的固体桥结构,短粒径粒子填充饱满,粒子间结合紧密。最佳的混配量为5%,颗粒具有较高的松弛密度,为1 074.79 kg/m³,最高的Meyer强度,为23.93 MPa,最低的比能耗,为27.06 kJ/kg,平衡含水率为11.65%,吸水速率*k*为0.015 3 min⁻¹。在热分析仪上进行了成型颗粒燃烧实验,颗粒燃烧过程较为平稳且有所延长,在升温速率10~40℃/min的范围内,着火温度*T_i*在246.60~265.00℃之间,最大失重速率(*dm/dτ*)_{max}在-6.84~-29.10%/min之间,综合燃烧指数*S*在7.26×10⁻¹²~1.09×10⁻¹⁰ min⁻²·K⁻³之间。在X射线荧光光谱仪上分析了颗粒灰分的元素组成,预测颗粒燃烧时具有中等或较高的结渣沾污趋势。

关键词: 生物质; 成型燃料; 固体桥结构; 燃烧特性

中图分类号: TK6 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2024)01-0350-10

OSID:



Construction of Solid Bridge Structured Biomass Pellets by *Eucalyptus* Sawdust and Its Combustion Characteristics

LI Weizhen^{1,2} LIU Huacai^{1,3} JIANG Yang^{1,2} YIN Xiuli^{1,2} XU Xuenan⁴ HONG Hao⁴

(1. Guangzhou Institute of Energy Conversion, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou 510640, China
2. CAS Key Laboratory of Renewable Energy, Guangzhou 510640, China
3. Guangdong Provincial Key Laboratory of New and Renewable Energy Research and Development, Guangzhou 510640, China
4. Jilin Hongri New Energy Co., Ltd., Changchun 130212, China)

Abstract: It is an effective way to improve the physical properties of biomass pellets by constructing “solid bridge” structures inside the pellets. A way of constructing “solid bridge” structured pellets was proposed by blending different particle sizes from one material. The construction scheme was set to add *eucalyptus* sawdust with (4 mm, 5 mm] particle size into *eucalyptus* sawdust with (0, 1 mm] particle size. The blending amount (referred to mass fraction of material with (4 mm, 5 mm] particle size in the total materials) was 0, 1%, 3%, 5%, 7%, 10%, 15%, 20%, 25%, 30%, 40% and 100%, respectively. The cross-sectional structures of the made pellets showed that with 5%~10% blending amount, a proper amount of “solid bridge” structures can be constructed by long fiber particle mechanical interlocking. Under this condition, short fiber particles were filled among these mechanical interlocks sufficiently and thus the pellet possessed particle tightly arrangements. The appropriate blending amount was 5%, under which condition the relaxed density, Meyer hardness and specific energy consumption of the pellets reached the relatively higher, the highest and the lowest values of 1 074.79 kg/m³, 23.93 MPa and 27.06 kJ/kg, respectively. Meanwhile, the equilibrium moisture content and moisture absorption rate of the pellets was 11.65% and 0.015 3 min⁻¹, respectively. Then,

收稿日期: 2023-04-19 修回日期: 2023-09-08

基金项目: 中国科学院战略性先导科技项目(XDA29010400)、广州市科技计划项目(202102080357)、吉林省与中国科学院科技合作项目(2021SYHZ0014)和长春市科技发展计划项目(22SH20_23SH20)

作者简介: 李伟振(1983—),男,高级工程师,博士,主要从事生物质热化学转化技术研究,E-mail: liwz@ms.giec.ac.cn

通信作者: 姜洋(1969—),男,正高级工程师,博士,主要从事生物质能利用技术研究,E-mail: jiangyang@ms.giec.ac.cn

the heating value analysis given the information that the structured pellets maintained the same higher heating value as the *eucalyptus* sawdust, which was 18.44 MJ/kg. At the heating rates of 10 ~ 40℃/min, the ignition temperature of pellet combustion (with 5% blending amount) was evaluated at 246.60 ~ 265.00℃, the burnout temperature was measured at 504.40 ~ 508.40℃, the maximum mass loss rate was assessed at -6.84 ~ -29.10%/min, and the mean mass loss rate was calculated at -6.84 ~ -29.10%/min, the integrated combustion index was determined at $7.26 \times 10^{-12} \sim 1.09 \times 10^{-10} \text{ min}^{-2} \cdot \text{K}^{-3}$. Besides, the slagging and fouling indices predicted a high or medium tendency for combustion.

Key words: biomass; pellet; “solid bridge” structure; combustion characteristics

0 引言

生物质能源在减少化石燃料消耗、环境污染和温室气体排放方面具有良好的前景,已经成为仅次于煤炭、石油和天然气的世界第四大能源,占能源消耗总量的 10% ~ 15%^[1]。生物质热化学转化技术可以将各类生物质原料转化为气体、液体或固体等与能源相关的终端产品^[2-5]。

生物质成型是在一定的温度与压力作用下,将松散的原料加工为形状规则、密度较大燃料的技术^[6]。相比自然状态的原料,成型燃料密度可提高 6 ~ 10 倍^[7],不仅可降低运输及存储成本,还可显著提高体积热值^[8],因此,大部分生物质原料在进行热化学转化前会被压缩为成型燃料。但是密度低和机械强度差的成型燃料在存储、运输及使用过程中易于破碎和形成粉尘^[9-10],因此,提高物理品质(密度和机械强度)是成型燃料主要发展方向之一。

成型燃料内部粒子的结合方式主要分为 2 种:①粒子间距离足够近,靠吸引力结合,如成型过程中粒子间或内部摩擦而产生的静电吸引力,能够使粒子相互结合,或当粒子间距离小于 0.1 μm 时,范德华力则成为粒子间结合的主要吸引力。②粒子间靠固体桥结构结合,形成机理有 2 种,一是分子的扩散作用形成固体桥结构,是指由于高压或高温的作用,分子在接触点从一个粒子扩散到另一个粒子;二是粒子间形成固体桥结构,主要是指一些成分的结晶、黏结剂的化学反应或硬化以及熔融组分的硬化。固体桥结构主要在产品致密的冷却或干燥过程中形成,主要是由于压缩的作用,纤维、扁平状粒子和体积较大的粒子间互锁或折叠,从而形成机械互锁固体桥结构^[11]。文献[11-12]研究证实,玉米秸秆和柳枝稷压缩成型过程中在压力的作用下,原料中的天然黏合剂会被挤出生物质细胞,同时在温度的作用下,这些天然黏结剂发生局部熔融,从而表现为覆盖在粒子上的玻璃涂层,这些涂层会连接 2 个或多个粒子,从而形成机械互锁的固体桥结构,有效地抵抗压缩后由弹性回复引起的破坏力。这种固体桥结构可由塑性变形引起,也可由天然黏结剂组分的熔

融再固化或颗粒之间的微凸体接触点引起。生物质是具有多孔结构的物质,因此,可以产生颗粒/分子从一个粒子扩散到另一个粒子的机械互锁结果,从而形成粒子间的固体桥结构。这种由分子扩散作用形成的固体桥结构通常需要高温高压的条件,以实现天然黏结剂的挤压、软化和熔融,这也造成成型的能耗较高^[13]。通过添加黏结剂的方法也可形成固体桥结构^[14-15],但这通常会降低颗粒的热值。文献[16]则通过在锯末成型时加入废弃包装纸的长纤维原料在颗粒内部构建了交叉结合的固体桥结构,保持了颗粒的热值和降低成型时的能耗,同时也使得燃料具有更好的机械耐久性^[16]。文献[17]还证实添加与锯末同属亲水性的水稻秸秆、橡胶树叶等长纤维原料,粒子间也能够有效互相缠绕,形成固体桥结构,从而改善颗粒物理品质^[17]。

此外,生物质原料种类对成型燃料物理品质也有较大影响。目前,天然林木屑尤其是松木屑是生物质成型及热化学转化的主要原料^[18]。能源需求的增加和市场规模的扩大导致了该种原料供给的不足,因此,有必要对替代原料进行研究。桉木屑是速生林桉木加工过程中的剩余物,目前被作为废弃物,将大量的桉木屑压缩成型后进行热化学转化,不仅可解决企业废弃物无法处理的难题,而且还能改善环境,增加企业收入,同时还能缓解成型燃料产业资源量受限等问题。因此,本文以速生林桉木屑为原料,采用同种原料不同粒径混配的方法来构建固体桥结构型的成型燃料,分析固体桥结构的构建对成型燃料物理品质的影响,并进一步研究所构建成型燃料的燃烧特性和结渣特性,以期桉木屑固体桥结构型成型燃料的生产和燃烧提供理论指导。

1 材料与方法

1.1 实验材料

桉木屑取自广东省阳山县的一家造纸厂,为生长在该地区的典型人工速生林尾叶桉的剩余物。原料经自然风干、粉碎和筛分后,分别取不同粒径的原料置于 105℃干燥箱内干燥至质量恒定,密封后放置于阴凉干燥处。

1.2 压缩成型实验

颗粒状成型燃料是目前应用最为广泛的成型燃料,在实际生产过程中原料粒径以 0 ~ 1 mm 为主,因此,固体桥结构的构建方案设置为在粒径(0,1 mm]的原料中混配粒径(4 mm,5 mm]的原料,以满足构建条件。混配量(粒径(4 mm,5 mm]的原料占总原料的质量分数)依次为 0、1%、3%、5%、7%、10%、15%、20%、25%、30%、40%、100%。生物质成型特性的影响因素有原料含水率、成型温度、压缩速度、保压时间、成型压力等,前期相关的研究表明适宜成型的原料含水率为 8% ~ 12%,较佳成型温度为 80 ~ 150℃,压缩速度和保压时间对成型的影响相对较小,颗粒状燃料较优的成型压力为 70 ~ 80 MPa^[10,19-22]。本研究主要考察通过不同粒径的同种原料混配成型来构建固体桥结构型成型燃料,因此将这些参数设定为固定值。原料含水率采用掺入一定质量去离子水的方法保持在 12%^[23],成型温度设定为 120℃,压缩速度设定为 20 mm/min、保压时间设定为 40 s、成型压力设定为 6 000 N (73.5 MPa)。压缩成型实验在 WD-100KE 型电子万能试验机(广州精控测试仪器有限公司)上进行,实验模具内径 10.20 mm,压杆直径 10 mm。实验过程中,采用加热带、热电偶和温控仪进行加热和温度控制,待温度达到设定值(120℃)并保持稳定后,向模具中加入一定质量的原料,然后调用压缩程序以速度 20 mm/min 对原料进行压缩成型,达到最大压力(6 000 N)并保压 40 s 后将颗粒挤出,每个实验条件重复 3 次,结果取平均值。成型过程的压力-位移曲线由计算机自行记录。

1.3 固体桥结构分析

采用文献[11,16-17]的方法,用电子扫描电镜观测颗粒内部是否存在长纤维粒子间的交叉缠绕,以判断是否构建固体桥结构。实验时先沿颗粒轴向中部位置用切片刀将颗粒横向切开,获得颗粒横截面薄片,再对薄片进行喷金处理,在薄片上形成导电膜层,以增强成像质量,然后将试样放在 S-4800 FESEM 型场发射扫描电子显微镜(株式会社日立制作所)内观测,获得不同放大倍数的颗粒内部横断面结构图,实验中电压为 2 kV。

1.4 颗粒物理品质

1.4.1 松弛密度

松弛密度是指颗粒密封保存 14 d 后的密度,实验中所制得颗粒为规则圆柱体,依据颗粒质量和体积计算松弛密度^[24],公式为

$$D_{rs} = \frac{4m}{1\,000\pi d^2 l}$$

(1)

式中 D_{rs} ——颗粒松弛密度,kg/m³
 m ——颗粒质量,g
 d ——颗粒直径,m
 l ——颗粒长度,m

1.4.2 Meyer 强度

Meyer 强度定义为压碎颗粒时单位压痕面积上的作用力,Meyer 强度体现颗粒的抗破碎能力,反映颗粒的机械强度。将密封保存 14 d 的颗粒水平放置在压杆下端(半圆形),使压杆正对颗粒中心位置,调用 Meyer 强度测试程序,下行速度设定为 5 mm/min,压杆下行时压力-位移曲线中压力快速升高后突然下降的点对应颗粒破碎点,依据破碎点的数据计算 Meyer 强度^[25],公式为

$$H_M = \frac{F}{\pi \sqrt{Dh - h^2} \sqrt{\frac{D_p^2}{4} - \left(\frac{\frac{D_p^2}{2} + \frac{DD_p}{2} - Dh - D_ph + h^2}{D + D_p - 2h} \right)^2}}$$

(2)

式中 H_M ——颗粒的 Meyer 强度,MPa
 F ——颗粒破碎时的压力,N
 h ——压杆压入深度,mm
 D ——压杆直径,取 7 mm
 D_p ——颗粒直径,取 10 mm

1.4.3 比能耗

比能耗是指压缩过程中单位质量原料所消耗的能量,依据压缩过程的压力-位移曲线计算比能耗^[24],公式为

$$E_{sc} = \frac{W}{m} = \frac{\int_0^{6\,000} f ds}{m}$$

(3)

式中 E_{sc} ——比能耗,kJ/kg
 W ——总能耗,J
 f ——压力,kN
 s ——位移,mm

1.4.4 平衡含水率

平衡含水率是在一定条件下颗粒与环境达到平衡时的含水率,将颗粒置于干燥箱内,105℃干燥 24 h 后,称取颗粒质量,此时含水率 M_i 为 0,然后将颗粒置于温度 30℃、相对湿度 90% 的 BPS-250CL 型恒温恒湿箱(上海一恒科学仪器有限公司)内,每隔一定时间,取出颗粒称取质量,计算颗粒瞬时含水率 M ,直至颗粒含水率基本保持不变,此时,颗粒含水率为 M_e 。前 2 h 内,每隔约 10 min 称取一次质量,此后每隔约 4 h 称取一次质量。在此基础上,采用美国农业生物工程师学会 ASABE S448.1 标准中薄层干燥模型可进一步计算颗粒的吸水性动力

学^[26], 公式为

$$\frac{M - M_e}{M_i - M_e} = e^{-kt} \quad (4)$$

式中 k ——吸水速率, min^{-1}
 t ——吸水时间, min

颗粒物理品质的 4 个指标中最重要的是颗粒密度和机械强度, 密度体现颗粒内部粒子间的粘结性能^[27], 机械强度反映颗粒的抗破碎能力^[28], 两个指标直接决定了颗粒运输、堆放及使用时的输送条件^[29]。而比能耗主要为生产过程提供参考, 平衡含水率主要为存储时间提供参考。

1.5 颗粒燃烧特性

1.5.1 工业分析、元素分析及热值

采用 Vario EL cube 型元素分析仪(德国元素分析系统公司)、5E-MAC IV 型全自动工业分析仪(长沙开元仪器有限公司)和 WZR-1T-CII 型微机量热计(长沙奔特仪器有限公司)进行原料和颗粒的元素分析、工业分析和热值分析。

1.5.2 燃烧特征参数及燃烧指数

采用热重的方法获得原料和颗粒剩余质量分数(TG 曲线)和质量损失速率(DTG 曲线)随温度和时间变化曲线(由计算机自动记录), 依据曲线确定燃烧特征参数。在此基础上, 计算 5 个燃烧指数以评价燃烧特性, 公式为^[30-31]

$$C_i = V_d (dm/d\tau)_{1\max} / (T_i + 273.15)^2 \quad (5)$$

式中 C_i ——着火特性指数, $\text{min}^{-1} \cdot \text{K}^{-2}$

V_d ——原料工业分析中的挥发分质量分数, %

$(dm/d\tau)_{1\max}$ ——DTG 曲线上第 1 个峰的峰值(最大质量损失速率), %/min

T_i ——着火温度(采用 TG 切线法来确定^[32]), $^{\circ}\text{C}$

$$D_v = (dm/d\tau)_{1\max} / [(T_{1\max} + 273.15) \cdot (T_i + 273.15) \Delta T_{1/2}] \quad (6)$$

式中 D_v ——挥发特性指数, $\text{min}^{-1} \cdot \text{K}^{-3}$

$T_{1\max}$ ——DTG 曲线上第 1 个峰的峰值所对应的温度(最大质量损失速率所对应温度), $^{\circ}\text{C}$

$\Delta T_{1/2}$ ——半峰宽度(DTG 曲线上第 1 个峰的两侧都有 1 个质量损失速率等于最大质量损失速率的 1/2, 这两个值对应的温度范围定义为 $\Delta T_{1/2}$), $^{\circ}\text{C}$

$$C_b = \alpha_1 \alpha_2 / \tau_h \quad (7)$$

其中 $\alpha_2 = 98\% - \alpha_1$

$$\alpha = (m_0 - m_{\tau}) / (m_0 - m_{\infty}) \times 100\%$$

式中 C_b ——燃尽特性指数, min^{-1}

α_1 ——初期质量转化率(对应 T_i 时的质量转化率, 与挥发分含量和着火性能有关), %

α_2 ——后期质量转化率(与碳含量和形态有关), %

τ_h ——燃尽时间($\alpha = 98\%$ 时所对应的时间), min

α ——质量转化率, %

m_0 ——原料初始质量, mg

m_{τ} ——原料瞬时质量, mg

m_{∞} ——原料最终质量, mg

$$C_r = (dm/d\tau)_{1\max} / (T_i + 273.15)^2 \quad (8)$$

式中 C_r ——可燃特性指数, $\text{min}^{-1} \cdot \text{K}^{-2}$

$$S = (dm/d\tau)_{\text{mean}} (dm/d\tau)_{1\max} / [(T_i + 273.15)^2 (T_h + 273.15)] \quad (9)$$

式中 S ——综合燃烧特性指数, $\text{min}^{-2} \cdot \text{K}^{-3}$

$(dm/d\tau)_{\text{mean}}$ ——平均质量损失速率, %/min

T_h ——燃尽温度($\alpha = 98\%$ 时所对应的温度), $^{\circ}\text{C}$

TG 实验在 STA 409C 型热分析仪(德国耐驰仪器制造有限公司)上进行, 实验前, 先进行同条件的空白实验(无样品), 以获得用于校正样品质量损失曲线的基线。实验时, 每次样品(1.5 g)置于 Al_2O_3 坩埚内, 温度先以升温速率 $5^{\circ}\text{C}/\text{min}$ 升至 105°C , 保持 30 min, 消除水分后, 再分别以升温速率 5、10、30、 $40^{\circ}\text{C}/\text{min}$ 升至 900°C , 燃烧过程中的保护气为氩气(流量 $60 \text{ cm}^3/\text{min}$), 反应气为空气($80\% \text{ N}_2 + 20\% \text{ O}_2$, 流量 $180 \text{ cm}^3/\text{min}$)。

1.5.3 结渣趋势

依据 GB/T 28731—2012 进行颗粒灰分的制备, 并采用 X 射线荧光光谱仪进行灰分的元素含量分析, 根据分析结果计算 5 个结渣沾污指数以预测颗粒燃烧时的结渣特性, 公式为^[33-34]

$$F_l = \varepsilon_{\text{SiO}_2} \quad (10)$$

式中 F_l ——结渣指数, %

$\varepsilon_{\text{SiO}_2}$ —— SiO_2 质量分数, %

$$R_{B/A} = (\varepsilon_{\text{Fe}_2\text{O}_3} + \varepsilon_{\text{CaO}} + \varepsilon_{\text{MgO}} + \varepsilon_{\text{Na}_2\text{O}} + \varepsilon_{\text{K}_2\text{O}} + \varepsilon_{\text{P}_2\text{O}_5}) / (\varepsilon_{\text{SiO}_2} + \varepsilon_{\text{Al}_2\text{O}_3} + \varepsilon_{\text{TiO}_2}) \quad (11)$$

式中 $R_{B/A}$ ——碱酸比

其中 $\varepsilon_{\text{Fe}_2\text{O}_3}$ 、 ε_{CaO} 、 ε_{MgO} 、 $\varepsilon_{\text{Na}_2\text{O}}$ 、 $\varepsilon_{\text{K}_2\text{O}}$ 、 $\varepsilon_{\text{P}_2\text{O}_5}$ 、 $\varepsilon_{\text{Al}_2\text{O}_3}$ 、 $\varepsilon_{\text{TiO}_2}$ 为 Fe_2O_3 、 CaO 、 MgO 、 Na_2O 、 K_2O 、 P_2O_5 、 Al_2O_3 、 TiO_2 质量分数, %。

$$A_{BI} = \varepsilon_{\text{Fe}_2\text{O}_3} / (\varepsilon_{\text{Na}_2\text{O}} + \varepsilon_{\text{K}_2\text{O}}) \quad (12)$$

式中 A_{Bl} ——团聚指数

$$F_u = R_{B/A} (\varepsilon_{Na_2O} + \varepsilon_{K_2O}) \tag{13}$$

式中 F_u ——沾污指数

$$S_r = 100\varepsilon_{SiO_2} / (\varepsilon_{SiO_2} + \varepsilon_{Fe_2O_3} + \varepsilon_{CaO} + \varepsilon_{MgO}) \tag{14}$$

式中 S_r ——黏度指数

2 结果与分析

2.1 固体桥结构

部分成型颗粒见图 1,在各混配量条件下原料均能成型,颗粒形状规则,表面光滑,但混配量增加,颗粒表面纹路由细致逐渐变为粗疏。混配量小于 10% 时,颗粒表面的形貌差别较小,表面并未观察到有粒径(4 mm,5 mm]的原料,说明所添加的长粒径原料主要分布于颗粒内部,可能是压缩过程中粒径(0,1 mm]的原料在压力的作用下较易沿径向扩散,而长粒径的原料更容易弯曲所致。混配量大于 10% 时,颗粒表面逐渐能观察到有粒径(4 mm,5 mm]的原料分布,这说明长粒径的原料逐渐布满整个颗粒内部并扩散至颗粒表面,短粒径的原料不足以将长粒径的原料挤压在颗粒内部,颗粒的表面形貌与混配量逐渐增大的实验方案相一致。

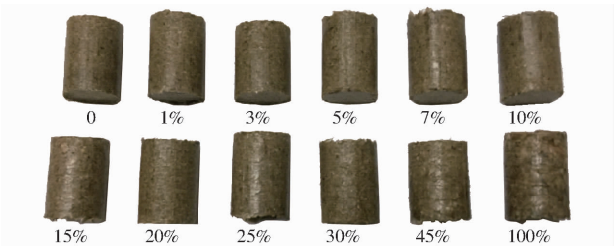


图 1 不同混配量下成型颗粒实物图

Fig. 1 Picture of pellets with different blending amounts

图 2 为部分颗粒内部横截面结构图。图 2a 混配量为 0,放大倍数为 120,能够观测到粒子间基本呈现片状堆积状态,粒子基本未发生形态变化,仍保

持着原始的形态,粒子间距较小,互相贴合,基本无缝隙,但也没有粒子间的交叉缠绕;图 2b 混配量为 5%,放大倍数为 35,能够观测到粒子大部分为短粒径的粒子,长粒径粒子形态发生变化,通过接触点的互相交叉延伸或折叠弯曲缠绕,较多的短粒径粒子除层状堆积状态外,还填充在长粒径粒子交叉缠绕所形成的空隙内,粒子间距较小,缝隙较小。这形成了长粒径粒子交叉缠绕、短粒径粒子片状堆积和缝隙填充的结合状态,与文献[16-17]所观测的结果基本一致,在一定机械互锁型固体桥结构的基础上,短粒径粒子在长粒径粒子间填充饱满;图 2c 混配量为 10%,放大倍数为 60,能够观测到更多的长粒径粒子发生形态变化,长粒径粒子在多点间互相交叉缠绕形成较多数量的固体桥结构,短粒径粒子片状堆积和在交叉缠绕空隙内填充,但长粒径粒子间距开始增大,粒子间有小缝隙出现,短粒径粒子填充基本饱满。图 2d、2e 混配量分别为 20% 和 40%,放大倍数为 60,能够观测到粒子大部分为长粒径粒子,粒子发生形态变化,互相交叉缠绕在一起,但短粒径粒子填充不饱满,长粒径粒子间留有较多和较大的缝隙,粒子结合状态较为混乱。图 2f 混配量为 100%,放大倍数为 120,只能观测到有长粒径粒子间的交叉缠绕,而无短粒径粒子的填充,粒子间留有更多和更大的缝隙,粒子状态混乱。

从分析结果可初步判断,混配量 5%~10% 时,粒径(4 mm,5 mm]的长粒径粒子互相交叉,能够形成合适数量的固体桥结构,粒径(0,1 mm]的短粒径粒子能够有效地填充在互相交叉的长粒径粒子缝隙间,粒子间结合紧密,是较合适的混配量;混配量过多,互相交叉的长粒径粒子缝隙不能得到有效的填充,粒子间结合较为松散,为不适宜的混配量。

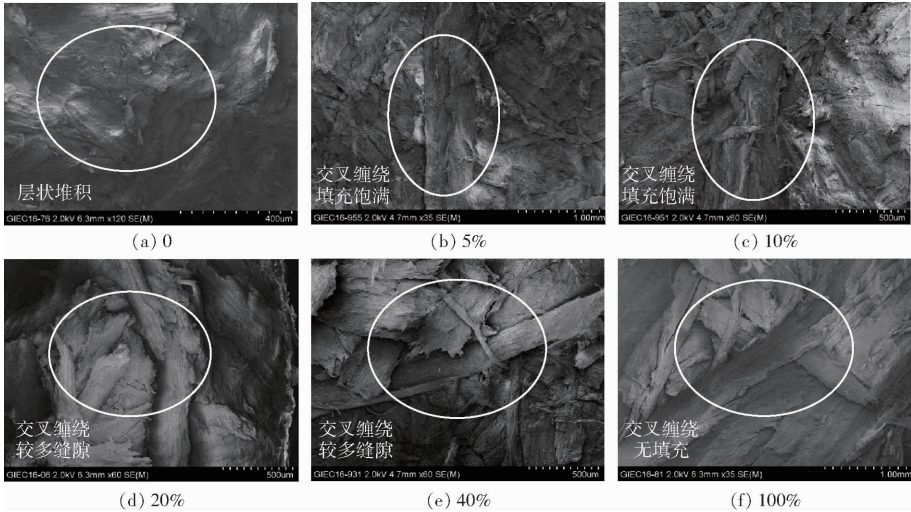


图 2 不同混配量下部分成型颗粒的内部横截面结构图

Fig. 2 Cross section of portion pellets with different blending amounts

2.2 颗粒物理品质

图 3 为颗粒的 D_{RS} 、 E_{SC} 、 H_M 、 M_e 随混配量的变化。见图 3a,混配量增加, D_{RS} 先增大后减小。混配量由 0 增加到 10%,颗粒 D_{RS} 由 1 054. 62 kg/m³ 增大到 1 093. 18 kg/m³,增加 3. 66%, D_{RS} 达到最大;混配量由 10% 增加到 100%, D_{RS} 减小到 981. 34 kg/m³,减小 10. 23%。见图 3b,混配量增加, H_M 先增大后减小。混配量由 0 增加到 5%, H_M 由 11. 56 MPa 增大到 23. 93 MPa,增大 107. 11%, H_M 达到最大;混配量由 5% 增加到 100%, H_M 降低到 8. 33 MPa,降低 59. 41%。见图 3c,混配量增加, E_{SC} 先降低后增大。

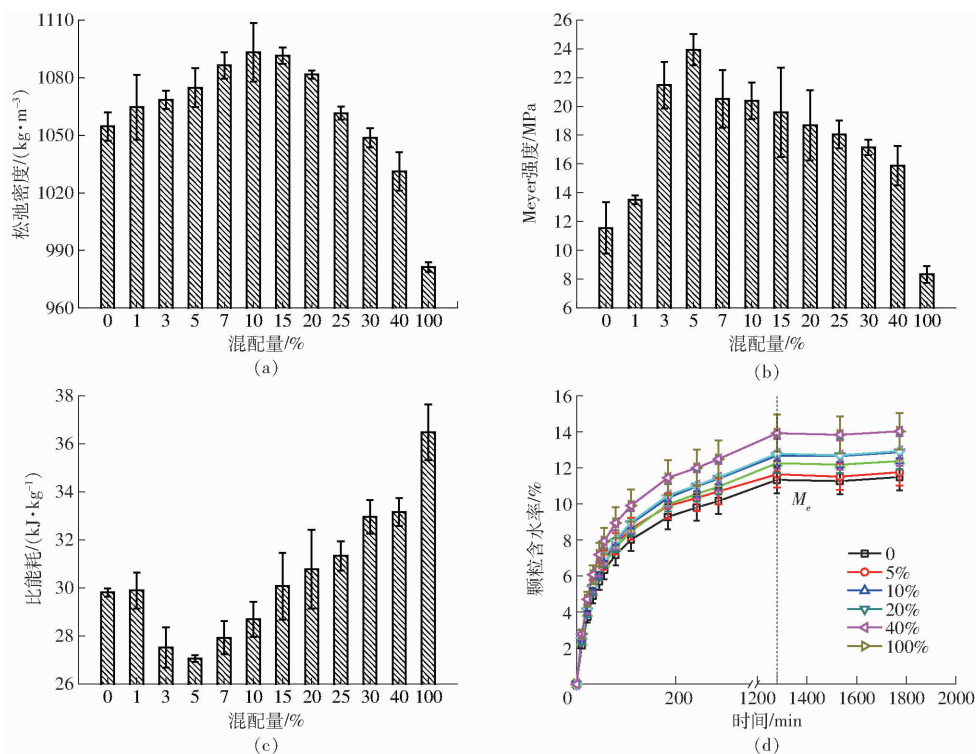


图 3 混配量对颗粒物理品质的影响曲线

Fig. 3 Physical properties of pellets with different blending amounts

由图 3 可知,混配量为 5% ~ 10% 时可适当提高颗粒的 D_{RS} ,明显提高颗粒的 H_M 和适当降低压缩过程的 E_{SC} ,起到了改善颗粒物理品质的作用,但混配量过高时则又会起到相反的作用。这与固体桥结构分析的结果相一致,混配量为 5% ~ 10% 时,颗粒内部长粒径粒子交叉缠绕,形成一定数量的固体桥结构,短粒径粒子填充饱满;但混配量超过 10% 时,虽有长粒径粒子的交叉缠绕,但短粒径粒子填充不饱满,留有较多缝隙。最佳的混配量为 5%,此时颗粒具有较高的 D_{RS} 、最高的 H_M 和最低的 E_{SC} ,分别为 1 074. 79 kg/m³、23. 93 MPa 和 27. 06 kJ/kg,此时颗粒平衡含水率为 11. 65%。

生物质成型过程中粒子的变形分为两个阶段:惯性变形阶段和弹-粘-塑性变形阶段^[35]。在惯性

混配量由 0 增加到 5%, E_{SC} 由 29. 82 kJ/kg 降低到 27. 06 kJ/kg,降低 9. 26%, E_{SC} 达到最小;混配量由 5% 增加到 100%, E_{SC} 增大到 36. 48 kJ/kg,增大 34. 81%。见图 3d,混配量不变,时间增加,颗粒含水率增大,各混配量条件下颗粒含水率变化规律基本一致,在测试时间约 1 279 min 时含水率基本达到平衡;时间不变,混配量增加,颗粒含水率增大,基本平衡时,颗粒含水率由混配量 0 时的 11. 34% 增大到混配量 100% 时的 13. 93%,这可能是因为混配量增加长粒径粒子增多,导致水分易于沿着这些增多的长粒径粒子向颗粒内部扩散和吸附。

变形阶段,粒子重新排列,大部分保持原始形状,但粒子间的间隙被一定程度压缩。在弹-粘-塑性变形阶段,粒子发生横向和纵向变形,一些粒子甚至被压扁而破碎或断裂。在压力取消后,变形消失的部分为粒子的弹性变形,即粒子的弹性回复;变形不可恢复的部分为粒子的塑性变形,即粒子的永久变形;同时,压缩过程中粒子本身含有的物质如蛋白质和果胶等会释放并作为粘结剂粘附粒子,即粒子的粘性变形。在弹-粘-塑性变形阶段,短粒径粒子间距离足够近时范德华力、静电力等短程作用力起主要作用,长粒径粒子因发生弹-粘-塑性变形而互相扩散而交叉缠绕,机械互锁结构起主要作用^[11,36]。因此,适量长粒径粒子的混配可构建固体桥结构,促使粒子间接触面积的增加,粒子间结合更加紧密;同

时,长粒径粒子间的机械互锁,也可促使粒子的弹性变形减小,有效抵消粒子的弹性回复,从而改善颗粒的物理品质。

此外,取 $M_i=0,1\,279\,\text{min}$ 时的颗粒含水率 M_e , 计算颗粒吸水速率 k , 结果见表 1, 可以看出 R^2 在 $0.89\sim0.91$ 之间, 说明方程能够很好地描述颗

粒吸水性。混配量 5% 时, 吸水速率 k 最大, 为 $0.015\,3\,\text{min}^{-1}$, 混配量 10% 时, 吸水速率 k 最小, 为 $0.012\,9\,\text{min}^{-1}$, 其他混配量时, 吸水速率 k 介于两者之间。

2.3 燃烧特性

2.3.1 工业分析、元素分析及热值

表 2 为桉木屑和成型颗粒(选择较佳的混配量 5%) 的元素分析、工业分析和热值测试结果, 发现原料的含水率略低于所要保持的 12%, 可能是因为原料中水分自然蒸发所导致, 而颗粒含水率减小较多, 主要是因为成型温度 120°C 导致压缩过程中水分蒸发较多所致^[37]。高位热值在成型前后基本保持不变, 低位热值则由于含水率的减小而有所增大。同时, 颗粒含水率的减小也导致元素分析中氢、氧含量有所减少, 而碳含量和工业分析中灰分、挥发分、固定碳含量有所增大。

表 2 桉木屑和颗粒(混配量 5%) 的元素分析、工业分析和热值

原料	元素分析(质量分数)/%				工业分析(质量分数)/%				热值/(MJ·kg ⁻¹)	
	氮	碳	氢	氧*	灰分	挥发分	固定碳*	水分	低位热值	高位热值
桉木屑	0.10	42.09	6.82	49.52	1.47	82.03	5.44	11.45	16.63	18.44
桉木颗粒	0.10	43.71	6.66	48.00	1.53	85.19	5.65	7.62	16.75	18.43

注: * 表示根据差值计算。

2.3.2 燃烧特征参数及燃烧指数

图 4 为桉木屑和成型颗粒(同样选择较佳的混配量 5%) 燃烧过程的 TG 和 DTG 曲线, 以升温速率 $30^\circ\text{C}/\text{min}$ 为例, 燃烧特征参数的确定过程见图 4c, 结果见表 3。可以看出相同升温速率条件下, 颗粒的质量损失速率 $(dm/d\tau)_{1\max}$ 、 $(dm/d\tau)_{2\max}$ 、 $(dm/d\tau)_{\text{mean}}$ 低于桉木屑的质量损失速率, 说明颗粒燃料过程较为平稳; 颗粒燃烧特征温度 T_i 、 $T_{1\max}$ 、 $T_{2\max}$ 、 T_h 高于桉木屑, 说明颗粒的燃烧过程较长, 这也与颗粒的 τ_h 高于桉木屑相一致, 造成这一现象的原因是压缩成型增大了密度, 燃烧时不利于氧气向颗粒内部扩散和挥发分的析出及固定碳的燃烧。升温速率增加

的条件下, 颗粒的 T_i 、 $T_{1\max}$ 、 $T_{2\max}$ 、 T_h 、 $(dm/d\tau)_{1\max}$ 、 $(dm/d\tau)_{2\max}$ 、 $(dm/d\tau)_{\text{mean}}$ 增大, 说明燃烧过程变得剧烈, 燃烧速率变快, 这是因为较高的燃烧速率会引起热滞现象^[38], 导致颗粒中挥发分和固定碳等成分在较短的时间内集中析出或燃烧所致。

表 4 列出了桉木屑和成型颗粒燃烧特性指数的计算结果, C_i 表示着火的难易程度, 其值越大, 越容易发生着火反应; D_v 反映挥发物释放性能; C_b 表示着火点和燃烧稳定性方面的燃尽性能; C_r 反映达到着火点后, 被点燃的难易程度, 其值越大说明可燃性越好, 火焰越稳定; S 反映综合燃烧情况, 其值越大, 说明着火性能和燃尽性能越好。可以看出, 相同升温速率条件下颗粒的 5 个指数低于桉木屑, 说明燃烧时颗粒不利于点火、燃烧稳定及燃尽, 这也与 TG

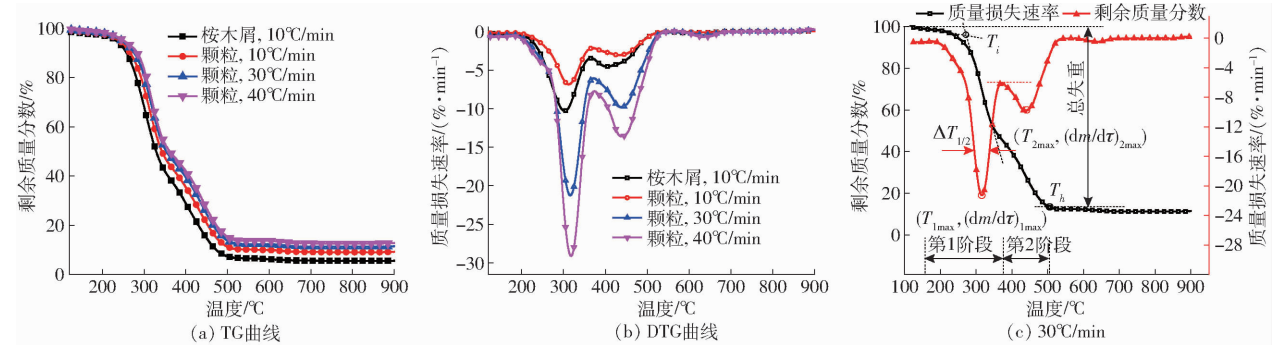


图 4 桉木屑和颗粒(混配量 5%) 的燃烧过程曲线

Fig. 4 Combustion process curves of eucalyptus sawdust and pellets with 5% blending amount

表 3 桉木屑和颗粒(混配量 5%)的燃烧特征参数

Tab.3 Combustion data of eucalyptus sawdust and pellets with 5% blending amount

原料	第 1 阶段							第 2 阶段				整体过程			
	升温速率/	终止温	质量损	T_i /	$T_{1\max}$ /	$(dm/d\tau)_{1\max}$ /	$\Delta T_{1/2}$ /	T_h /	质量损	$T_{2\max}$ /	$(dm/d\tau)_{2\max}$ /	τ_h /	$(dm/d\tau)_{\text{mean}}$ /	α_1 /	α_2 /
	($^{\circ}\text{C}\cdot\text{min}^{-1}$)	度/ $^{\circ}\text{C}$	失率/%	$^{\circ}\text{C}$	$^{\circ}\text{C}$	($\%\cdot\text{min}^{-1}$)	$^{\circ}\text{C}$	$^{\circ}\text{C}$	失率/%	$^{\circ}\text{C}$	($\%\cdot\text{min}^{-1}$)	min	($\%\cdot\text{min}^{-1}$)	%	%
桉木屑	10	365.60	61.93	231.20	303.20	-10.30	81.00	497.80	30.58	403.80	-4.54	39.28	2.36	0.05	0.93
颗粒	10	369.80	57.31	246.60	312.40	-6.84	70.60	504.40	31.67	432.60	-3.07	39.94	2.23	0.06	0.92
颗粒	30	372.00	54.27	259.20	316.40	-21.23	61.80	507.00	32.51	437.60	-9.79	13.40	6.48	0.08	0.90
颗粒	40	373.80	52.51	265.00	318.20	-29.10	58.00	508.40	32.96	443.00	-13.59	10.09	8.47	0.08	0.90

表 4 桉木屑和颗粒(混配量 5%)不同升温速率下的燃烧特性指数

Tab.4 Combustion characteristic indices of eucalyptus sawdust and pellets with 5% blending amount

原料	升温速率/($^{\circ}\text{C}\cdot\text{min}^{-1}$)	C_i /($\text{K}^{-2}\cdot\text{min}^{-1}$)	D_v /($\text{K}^{-3}\cdot\text{min}^{-1}$)	C_b /min $^{-1}$	C_r /(min $^{-1}\cdot\text{K}^{-2}$)	S /(min $^{-2}\cdot\text{K}^{-3}$)
桉木屑	10	3.73×10^{-7}	4.37×10^{-9}	1.18×10^{-3}	4.05×10^{-7}	1.24×10^{-11}
颗粒	10	2.16×10^{-7}	3.18×10^{-9}	1.38×10^{-3}	2.53×10^{-7}	7.26×10^{-12}
颗粒	30	6.38×10^{-7}	1.10×10^{-8}	5.37×10^{-3}	7.49×10^{-7}	6.22×10^{-11}
颗粒	40	8.56×10^{-7}	1.58×10^{-8}	7.14×10^{-3}	1.01×10^{-6}	1.09×10^{-10}

曲线及表 3 中的数据相一致。升温速率增加的条件
下,颗粒 5 个指数也增大(C_i 、 D_v 、 C_b 、 C_r 4 个指数与
升温速率呈线性关系, R^2 分别为 1、0.99、1、1)^[39],
说明升温速率增加利于颗粒燃烧,在 10 ~
40 $^{\circ}\text{C}/\text{min}$ 的范围内,颗粒综合燃烧特性指数介于
7.26 $\times 10^{-12}$ ~ 1.09 $\times 10^{-10}$ min $^{-2}\cdot\text{K}^{-3}$ 之间。

2.3.3 结渣趋势

颗粒(混配量 5%)灰分中元素质量分数分析结
果为 $\varepsilon_{\text{CaO}} = 12.28\%$ 、 $\varepsilon_{\text{SiO}_2} = 36.09\%$ 、 $\varepsilon_{\text{MgO}} = 8.38\%$ 、
 $\varepsilon_{\text{Al}_2\text{O}_3} = 0.95\%$ 、 $\varepsilon_{\text{K}_2\text{O}} = 8.74\%$ 、 $\varepsilon_{\text{SO}_3} = 1.62\%$ 、 $\varepsilon_{\text{Fe}_2\text{O}_3} =$
0.42%、 $\varepsilon_{\text{P}_2\text{O}_5} = 21.67\%$ 、 $\varepsilon_{\text{Na}_2\text{O}} = 0.15\%$ 、 $\varepsilon_{\text{TiO}_2} =$
0.40%,依据分析结果计算结渣沾污指数为 $F_l =$
36.09%、 $R_{B/A} = 1.40$ 、 $A_{BI} = 0.05$ 、 $F_u = 12.79$ 、 $S_r =$
63.13,并依据表 5 中的方法预测灰分的结渣沾污趋
势^[40]。SiO₂是生物质灰分中的主要元素,尽管其在
1 700 $^{\circ}\text{C}$ 下才会熔化,但 SiO₂可与 K 和 Na 结合,形成
低熔点的共晶体。灰分中 SiO₂含量与燃烧后灰分
含量和灰分中形成渣块的比例存在良好的相关性,
因此,SiO₂含量用于表示 F_l ,根据 SiO₂的含量判断颗
粒燃烧时具有较高的结渣沾污趋势。灰分中碱性化
合物会降低灰分的熔融温度,而酸性化合物则会提
高灰分的熔融温度,碱酸比计算的结果表明,颗粒燃
烧时具有较高的结渣沾污趋势。燃料在流化床中燃
烧时,团聚是阻碍燃烧的主要问题, A_{BI} 是考虑了
Fe₂O₃对团聚的抑制作用来预测灰分的团聚特性,
 A_{BI} 计算结果表明颗粒在流化床中燃烧时同样具有
较高的结渣沾污趋势。K 和 Na 的碱性化合物在燃
烧过程中会蒸发和分解,形成低熔点的共晶化合物,
在没有或较少 Cl 的条件下导致结渣沾污,因此, F_u
通过扩展碱酸比指数以包含该影响, F_u 的计算结果

表明颗粒具有中等的结渣沾污趋势。结渣沾污指数
计算结果表明成型颗粒灰分具有中等或较高的结渣
沾污趋势,这会是颗粒燃烧时所面临的主要问题
之一^[40]。

表 5 原料灰分的结渣沾污趋势

Tab.5 Slagging and fouling tendencies of material ashes

结渣沾污指数	数值	结渣沾污趋势
$F_l/\%$	0 ~ 20.00	低
	20.00 ~ 25.00	中等
	> 25.00	高
$R_{B/A}$	0 ~ 0.50	低
	0.50 ~ 1.00	中等
	1.00 ~ 1.75	高
	> 1.75	极高
A_{BI}	0 ~ 0.15	高
F_u	0 ~ 0.60	低
	0.60 ~ 40.00	中等
	> 40.00	高
S_r	> 72.00	低
	65.00 ~ 72.00	中等
	0 ~ 65.00	高

3 结束语

主要进行固体桥结构型生物质颗粒燃料的构
建及构建后颗粒燃料燃烧特性的研究,提出了同
种原料不同粒径混配成型的构建方法,以速生林
桉木屑为原料进行的压缩成型实验结果表明该方
法是一种有效的构建方法,起到了改善颗粒物理
品质的作用。在粒径 (0,1 mm] 的原料中混配
5% ~ 10% 的粒径 (4 mm,5 mm] 原料可在颗粒内
部构建适量的固体桥结构,短粒径粒子在交叉缠
绕的长粒径粒子间填充饱满,粒子间结合紧密。

较佳的混配量为 5% ,颗粒具有较高的 D_{rs} 、最高的 H_M 和最低的 E_{sc} , 分别为 1 074.79 kg/m³、23.93 MPa 和 27.06 kJ/kg, 此时 M_e 为 11.65% , k 为 0.015 3 min⁻¹。成型后颗粒的含水率减少,高位热值基本不变(18.44 MJ/kg),低位热值增大,颗粒的燃料过程较为平稳且有所延长,在升温速

率 10 ~ 40℃/min 范围内,颗粒的着火温度 T_i 在 246.60 ~ 265.00℃ 之间,最大失重速率 $(dm/d\tau)_{\max}$ 在 -6.84 ~ -29.10 %/min 之间,综合燃烧指数 S 在 $7.26 \times 10^{-12} \sim 1.09 \times 10^{-10} \text{ min}^{-2} \cdot \text{K}^{-3}$ 之间,升温速率的增加利于颗粒的燃烧,但颗粒灰分表现出中等或较高的结渣沾污趋势。

参 考 文 献

[1] SHARMA P, PANDEY O P, DIWAN P K. Non-isothermal kinetics of pseudo-components of waste biomass[J]. Fuel, 2019, 253: 1149 – 1161.

[2] 马中青, 薛俊杰, 袁世震, 等. 生物质气化联产燃气和炭的研究进展[J]. 林产化学与工业, 2023, 43(3): 145 – 159. MA Zhongqing, XUE Junjie, YUAN Shizhen, et al. Progress of co-production of gas and char from biomass gasification[J]. Chemistry and Industry of Forest Products, 2023, 43(3): 145 – 159. (in Chinese)

[3] 张林野, 吉帝安, 马志鹏, 等. 生物质水热液化研究现状与展望[J]. 当代化工研究, 2022(20): 10 – 13. ZHANG Linye, JI Di'an, MA Zhipeng, et al. Research status and prospect of biomass hydrothermal liquefaction[J]. Modern Chemical Research, 2022(20): 10 – 13. (in Chinese)

[4] 苏鑫, 刘静, 陈冠益, 等. 煤耦合生物质气化发电技术研究进展[J]. 煤炭学报, 2023, 48(6): 2261 – 2278. SU Xin, LIU Jing, CHEN Guanyi, et al. Progress in coal-coupled biomass gasification technology for power generation[J]. Journal of China Coal Society, 2023, 48(6): 2261 – 2278. (in Chinese)

[5] 金安, 李建华, 高明, 等. 生物质发电技术研究与应用进展[J]. 能源研究与利用, 2022(5): 19 – 24. JIN An, LI Jianhua, GAO Ming, et al. Progress of research and application in biomass technology for power generation[J]. Energy Research & Utilization, 2022(5): 19 – 24. (in Chinese)

[6] 贾敬敦, 马隆龙, 蒋丹平, 等. 生物质能源产业科技创新发展战略[M]. 北京: 化学工业出版社, 2014.

[7] SAIDUR R, ABDELAZIZ E A, DEMIRBAS A, et al. A review on biomass as a fuel for boilers[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2011, 15(5): 2262 – 2289.

[8] 张百良. 农村能源工程学[M]. 北京: 中国农业出版社, 1999.

[9] 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.

[10] TUMULURU J S, TABIL L G, SONG Y, et al. Impact of process conditions on the density and durability of wheat, oat, canola, and barley straw briquettes[J]. Bioenergy Research, 2015, 8(1): 388 – 401.

[11] KALIYAN N, MOREY R V. Natural binders and solid bridge type binding mechanisms in briquettes and pellets made from corn stover and switchgrass[J]. Bioresource Technology, 2010, 101(3): 1082 – 1090.

[12] KALIYAN N, VANCE MOREY R. Factors affecting strength and durability of densified biomass products[J]. Biomass and Bioenergy, 2009, 33(3): 337 – 359.

[13] LI H, LIU X, LEGROS R, et al. Pelletization of torrefied sawdust and properties of torrefied pellets[J]. Applied Energy, 2012, 93(Special Issue): 680 – 685.

[14] CHIN O C, SIDDIQUI K M. Characteristics of some biomass briquettes prepared under modest die pressures[J]. Biomass & Bioenergy, 2000, 18(3): 223 – 228.

[15] 吕东慧. 麦秸颗粒制备及能源化成型添加剂的研究[D]. 北京: 中国农业大学, 2014. LÜ Donghui. Technology of manufacturing wheat straw pellets and the effect of binders on wheat straw fuel pellets[D]. Beijing: China Agricultural University, 2014. (in Chinese)

[16] KONG L, TIAN S, HE C, et al. Effect of waste wrapping paper fiber as a “solid bridge” on physical characteristics of biomass pellets made from wood sawdust[J]. Applied Energy, 2012, 98: 33 – 39.

[17] KONG L, XIONG Y, LIU T, et al. Effect of fiber natures on the formation of “solid bridge” for preparing wood sawdust derived biomass pellet fuel[J]. Fuel Processing Technology, 2016, 144: 79 – 84.

[18] 李伟振, 姜洋, 阴秀丽, 等. 速生林桉木屑与天然林木屑的成型特性比较[J]. 安徽农业科学, 2019, 47(1): 103 – 106. LI Weizhen, JIANG Yang, YIN Xiuli, et al. Comparison of compression properties between fast-growing forest eucalyptus sawdust and natural forest hardwood sawdust[J]. Journal of Anhui Agricultural Sciences, 2019, 47(1): 103 – 106. (in Chinese)

[19] MANI S, TABIL L G, SOKHANSANJ S. Effects of compressive force, particle size and moisture content on mechanical properties of biomass pellets from grasses[J]. Biomass and Bioenergy, 2006, 30(7): 648 – 654.

[20] OBERNBERGER I, THEK G. Physical characterisation and chemical composition of densified biomass fuels with regard to their combustion behaviour[J]. Biomass and Bioenergy, 2004, 27(6): 653 – 669.

[21] TUMULURU J S, WRIGHT C T, HESS J R, et al. A review of biomass densification systems to develop uniform feedstock commodities for bioenergy application[J]. Biofuels, Bioproducts and Biorefining, 2011, 5(6): 683 – 707.

[22] LAM P Y, LAM P S, SOKHANSANJ S, et al. Effects of pelletization conditions on breaking strength and dimensional stability of Douglas fir pellet[J]. Fuel, 2014, 117: 1085 – 1092.

[23] 王功亮, 姜洋, 李伟振, 等. 基于响应面法的玉米秸秆成型工艺优化[J]. 农业工程学报, 2016, 32(13): 223 – 227.

- WANG Gongliang, JIANG Yang, LI Weizhen, et al. Process optimization of corn stover compression molding experiments based on response surface method[J]. Transactions of the CSAE, 2016, 32(13): 223–227. (in Chinese)
- [24] 李伟振, 姜洋, 王微, 等. 温度对 4 种典型生物质成型特性的影响[J]. 生物质化学工程, 2019, 53(5): 27–33. LI Weizhen, JIANG Yang, WANG Wei, et al. Effects of temperature on pelletization of four typical types of biomass[J]. Biomass Chemical Engineering, 2019, 53(5): 27–33. (in Chinese)
- [25] 李伟振, 姜洋, 饶曙, 等. 玉米秸秆和木屑及木钠混配成型工艺参数优化[J]. 农业工程学报, 2018, 34(1): 198–203. LI Weizhen, JIANG Yang, RAO Shu, et al. Parameter optimization of corn stover blended with sawdust and sodium lignosulphonate compression experiments[J]. Transactions of the CSAE, 2018, 34(1): 198–203. (in Chinese)
- [26] LAM P S, SOKHANSANJ S, BI X, et al. Energy input and quality of pellets made from steam-exploded douglas fir (*Pseudotsuga menziesii*) [J]. Energy & Fuels, 2011, 25(4): 1521–1528.
- [27] 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 and Bioenergy, 2011, 35(2): 910–918.
- [28] 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 Yang, LI Weizhen, JIANG Enchen, et al. Experimental research of effect of molding parameters on quality of *eucalyptus* residue pellets[J]. Acta Energiæ Solaris Sinica, 2017, 38(4): 900–905. (in Chinese)
- [29] GARCÍA-MARAVER A, POPOV V, ZAMORANO M. A review of European standards for pellet quality[J]. Renewable Energy, 2011, 36(12): 3537–3540.
- [30] ZOU H, EVRENDILEK F, LIU J, et al. Combustion behaviors of pileus and stipe parts of *Lentinus edodes* using thermogravimetric-mass spectrometry and Fourier transform infrared spectroscopy analyses; thermal conversion, kinetic, thermodynamic, gas emission and optimization analyses[J]. Bioresource Technology, 2019, 288: 121481.
- [31] TU R, JIANG E, YAN S, et al. The pelletization and combustion properties of torrefied camellia shell via dry and hydrothermal torrefaction; a comparative evaluation[J]. Bioresource Technology, 2018, 264: 78–89.
- [32] 傅杰文, 刘敬勇, 孙水裕, 等. 污泥与煤在 CO_2/O_2 及 N_2/O_2 气氛条件下的混燃特性分析[J]. 环境科学学报, 2017, 37(3): 1021–1031. FU Jiewen, LIU Jingyong, SUN Shuiyu, et al. Co-combustion characteristic of sewage sludge and coal under CO_2/O_2 and N_2/O_2 atmosphere[J]. Acta Scientiæ Circumstantiæ, 2017, 37(3): 1021–1031. (in Chinese)
- [33] 姚锡文, 许克强, 刘清华, 等. 生物质热转化过程中积灰沾污结渣特性及趋势预测研究进展[J/OL]. 安全与环境学报, <https://doi.org/10.13637/j.issn.1009-6094.2022.0431>.
- [34] LI W, HUANG Y, XIE J, et al. Assessment of *Flammulina velutipes* residue as potential fuels for co-combustion with pine sawdust from characteristics of combustion process, flue gases and ashes[J]. Journal of Analytical and Applied Pyrolysis, 2020, 149: 1370–1385.
- [35] SONG X, ZHANG M, PEI Z J, et al. Ultrasonic vibration-assisted (UV–A) pelleting of wheat straw; a constitutive model for pellet density[J]. Ultrasonics, 2015, 60: 117–125.
- [36] TABIL L, SOKHANSANJ S, TYLER R T. Performance different binders during alfalfa pelleting[J]. Canadian Agricultural Engineering, 1997, 39(1): 17–23.
- [37] 王明峰, 叶国辉, 蒋恩臣, 等. 桉树木屑热压成型特性研究[J]. 太阳能学报, 2018, 39(10): 2884–2890. WANG Mingfeng, YE Guohui, JIANG Enchen, et al. Research of hot press forming characteristics of *eucalyptus* sawdust[J]. Acta Energiæ Solaris Sinica, 2018, 39(10): 2884–2890. (in Chinese)
- [38] WANG Y, WU H, SAROSSY Z, et al. Release and transformation of chlorine and potassium during pyrolysis of KCl doped biomass[J]. Fuel, 2017, 197: 422–432.
- [39] 冯浩, 左彩彪, 王秉飞, 等. 不同升温速率下混矸煤燃烧特性分析[J]. 能源与节能, 2018(4): 20–22. FENG Hao, ZUO Caibiao, WANG Bingfei, et al. Analysis of combustion characteristics of coal mixed gangue under different heating rates[J]. Energy and Energy Conservation, 2018(4): 20–22. (in Chinese)
- [40] GARCIA-MARAVER A, MATA-SANCHEZ J, CARPIO M, et al. Critical review of predictive coefficients for biomass ash deposition tendency[J]. Journal of the Energy Institute, 2017, 90(2): 214–228.