

速生林桉木屑与天然林木屑的成型特性比较

李伟振^{1,2,3}, 姜洋^{1,2,3*}, 阴秀丽^{1,2,3}, 罗光辉⁴

(1. 中国科学院广州能源研究所, 广东广州 510640; 2. 中国科学院可再生能源重点实验室, 广东广州 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, 广东广州 510640; 4. 通河县龙能资源再生利用有限公司, 黑龙江哈尔滨 150900)

摘要 [目的]比较速生林桉木屑与天然林木屑的成型特性。[方法]对比速生林桉木屑与现有应用成熟的天然林硬杂木屑的成型差异,在WD-100KE型电子压力机上进行桉木屑与硬杂木屑的单颗粒压缩成型试验,研究成型参数水分8%~16%、温度80~160℃、压力4 000~8 000 N、粒径1~5 mm对成型指标松弛密度、比能耗、Meyer强度的影响。[结果]水分12%~14%、温度100~120℃、压力5 000~6 000 N、粒径2~3 mm为桉木屑及硬杂木屑较佳的成型参数范围;相同成型条件下,桉木屑与硬杂木屑相比松弛密度相差不大,但比能耗明显较高、颗粒Meyer强度明显较低。[结论]为了降低桉木屑成型能耗、提高颗粒强度及提高现有生产设备的原料适应性,可采用与现有硬杂木屑混配成型的方式,以提高成型效果。

关键词 桉木屑;颗粒;比能耗;能源化

中图分类号 S789 **文献标识码** A

文章编号 0517-6611(2019)01-0103-04

doi: 10. 3969/j. issn. 0517-6611. 2019. 01. 032



开放科学(资源服务)标识码(OSID):

Comparison of Compression Properties between Fast-growing Forest Eucalyptus Sawdust and Natural Forest Hardwood Sawdust
LI Wei-zhen^{1, 2, 3}, JIANG Yang^{1, 2, 3}, YIN Xiu-li^{1, 2, 3} et al (1. Guangzhou Institute of Energy Conversion, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou, Guangdong 510640; 2. CAS Key Laboratory of Renewable Energy, Guangzhou, Guangdong 510640; 3. Guangdong Provincial Key Laboratory of New and Renewable Energy Research and Development, Guangzhou, Guangdong 510640)

Abstract [Objective] To compare the compression characteristics of eucalyptus sawdust and natural sawdust in fast-growing forest. [Method] Comparing with the compression properties between fast-growing forest eucalyptus sawdust and natural forest hardwood sawdust, the single pellet compression experiments were conducted on the WD-100KE type electronic pressure machine. The effects of compression parameters of moisture 8%-16%, temperature 80-160℃, pressure 4 000-8 000 N, and particle size 1-5 mm on relaxed density, specific energy consumption, Meyer hardness were investigated in detail. [Result] The suitable pellet production condition for eucalyptus sawdust was 12%-14% moisture, 100-120℃ temperature, 5 000-6 000 N pressure, and 2-3 mm particle size. Compared eucalyptus sawdust with hardwood sawdust, the relaxed density was similar, the specific energy consumption was significantly higher, and the Meyer hardness was significantly lower. [Conclusion] Eucalyptus sawdust blended with hardwood sawdust could be adopted in order to reduce the energy consumption, improve pellets Meyer hardness and the adaptability of existing production equipment.

Key words Eucalyptus sawdust; Pellets; Specific energy consumption; Energy utilization

天然林木屑是目前国内常用的生物质成型燃料生产原料,针对其成型特性的研究较为深入,生产技术较为成熟,已有规模化应用^[1-3]。随着市场规模的扩大,天然林原料资源受限,价格不断上涨,严重制约产业的规模化发展。2015年,华南地区天然林木屑原料价格已由原来400元/t左右上涨到650元/t左右^[4],直接导致企业利润下降,使企业处于亏损或微利状态运行。因此,部分企业开始寻求以农作物秸秆、速生林剩余物、树皮、果壳等为原料进行成型燃料生产。

桉树具有速生、丰产、经济效益显著等优点,已成为我国速生林的战略树种^[5],目前,我国桉树林种植面积达368万hm²,其中广东省种植面积达110万hm²,在桉树加工过程中每年有150多万t的剩余物被废弃^[6],不仅造成严重的环境污染,还造成资源浪费^[7]。将大量的桉树加工剩余物加工为成型燃料,进行能源化利用,不仅能解决桉树加工企业废弃物无法处理的难题,而且还能解决成型燃料生产企业原料资源量受限问题^[8]。但是,由于对桉树加工剩余物的成型特性研究较少,其是否适应于成型燃料生产及对现有生产

设备的适应特性未知,笔者以桉树加工剩余物——桉木屑为原料,进行单颗粒压缩成型试验,考察水分、温度、压力、粒径4个参数对比能耗、松弛密度、Meyer强度的影响,系统研究其成型特性,同时,以现有应用成熟的天然林硬杂木屑为参照物,对比2种原料成型特性的差异,分析桉木屑作为成型燃料生产原料的可行性,以期桉木屑的能源化利用提供一定理论支撑。

1 材料与方法

1.1 材料 桉木屑取自广东阳山一造纸厂,为生长在该地区典型人工速生林尾叶桉的剩余物;硬杂木屑取自广东广州一家家具厂,为天然林橡木、樟木等的剩余物。原料经自然风干、粉碎和筛分后置于105℃干燥箱至恒重后掺入一定质量的去离子水,均匀混合后获得不同水分含量的样品,密封后放置阴凉干燥处。参考美国国家可再生能源实验室的方法测定原料的三大组分^[9],结果见表1。

表1 桉木屑和硬杂木屑的主要化学组分

Table 1 Chemical composition of eucalyptus sawdust and hardwood sawdust

样品 Samples	%(干基)			
	木质素 Lignin	纤维素 Cellulose	半纤维素 Hemicellulose	灰分 Ash
桉木屑 Eucalyptus sawdust	35.58	36.04	16.53	1.48
硬杂木屑 Hardwood sawdust	36.26	36.18	17.61	0.56

基金项目 黑龙江省省院科技合作项目(KS2018KH0090);中国科学院可再生能源重点实验室基金项目(y807j91001)。

作者简介 李伟振(1983—),男,河南开封人,高级工程师,硕士,从事生物质成型技术研究。*通信作者,正高级工程师,从事生物质能利用技术研究。

收稿日期 2018-06-27; **修回日期** 2018-08-15

1.2 方法 成型过程的主要影响因素有水分、压力、温度、粒径等^[10],根据相关研究结果^[11-13],选定参数取值范围:原料水分 8%~16%、成型压力 4 000~8 000 N、成型温度 80~160 ℃、原料粒径 1~5 mm。采用单因素试验设计方法,考察其他参数的影响时设定水分 14%、压力 6 000 N、温度 120 ℃、粒径 3 mm。

压缩试验在 WD-100KE 型电子万能试验机上进行,试验模具压杆直径 10.0 mm,模具内径 10.2 mm。试验过程中,采用加热带、热电偶和温控仪进行加热和温度控制,待温度达到设定值并保持稳定后,向模具中加入一定质量原料,然后调用压缩程序(设定压缩速度 20 mm/min、目标压力值、保压时间 40 s)对原料压缩成型,完毕后将颗粒挤出,每个试验条件重复 5 次,结果取 3 个中间值的平均值^[14-15]。成型过程的压力-位移曲线由电脑自行记录。

1.2.1 松弛密度 RDS(relaxed density)。颗粒密封保存 14 d 后的密度为 RDS,该试验中所制得颗粒为规则圆柱体,依据颗粒的质量和体积计算 RDS。

$$RDS=\frac{4m}{\pi d^2l}$$

(1)

式中,RDS 为颗粒的松弛密度(kg/m³);*m* 为颗粒质量(kg);*d* 为颗粒直径(m);*l* 为颗粒长度(m)。

1.2.2 比能耗 SEC(specific energy consumption)。压缩过程单位质量原料所耗能量为 SEC,依据压缩过程的压力-位移曲线计算 SEC。

$$SEC=\frac{W}{m}=\frac{\int f \cdot ds}{m}$$

(2)

式中,SEC 为比能耗(kJ/kg);*W* 为总能耗(J);*m* 为颗粒质量(g);*f* 为压力(kN);*s* 为位移(mm)。

1.2.3 Meyer 强度 *H_M*(Meyer hardness)。压碎颗粒时,单位压痕面积上的作用力为 *H_M*。将储存 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 *H_M* 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的破碎点,依据破碎点的数据计算 *H_M*^[16]。

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

(3)

式中,*H_M* 为颗粒的 Meyer 强度(N/mm²);*F* 为颗粒破碎时的压力(N);*h* 为压杆压入深度(mm);*D* 为压杆直径(7 mm);*D_p* 为颗粒直径(10 mm)。

2 结果与分析

2.1 RDS 图 1 为成型参数对桉木屑和硬杂木屑 RDS 的影响。由图 1a 可知,水分增加,RDS 先增大后减小,桉木屑颗粒 RDS 由 1 028.11 kg/m³(水分 8%)先增大到 1 072.76 kg/m³(水分 10%),增大了 4.34%,再减小到 1 027.69 kg/m³(水分 16%),减小了 4.20%,桉木屑与硬杂木屑 RDS 相差最大比例为-3.64%(水分 14%)。由图 1b 可知,温度升高,RDS 增大,桉木屑颗粒 RDS 由 939.29 kg/m³(温度 80 ℃)增大到 1 114.80 kg/m³(温度 160 ℃),增大了 18.68%,桉木屑与硬杂木屑 RDS 相差最大比例为-3.88%(温度 100 ℃)。由图 1c 可知,压力提高,RDS 增大,桉木屑颗粒 RDS 由 985.72 kg/m³增大到 1 136.20 kg/m³,增大了 15.27%。桉木屑与硬杂木屑 RDS 相差最大比例为-3.71%(压力 4 000 N)。由图 1d 可知,粒径增大,RDS 先增大后减小,桉木屑颗粒

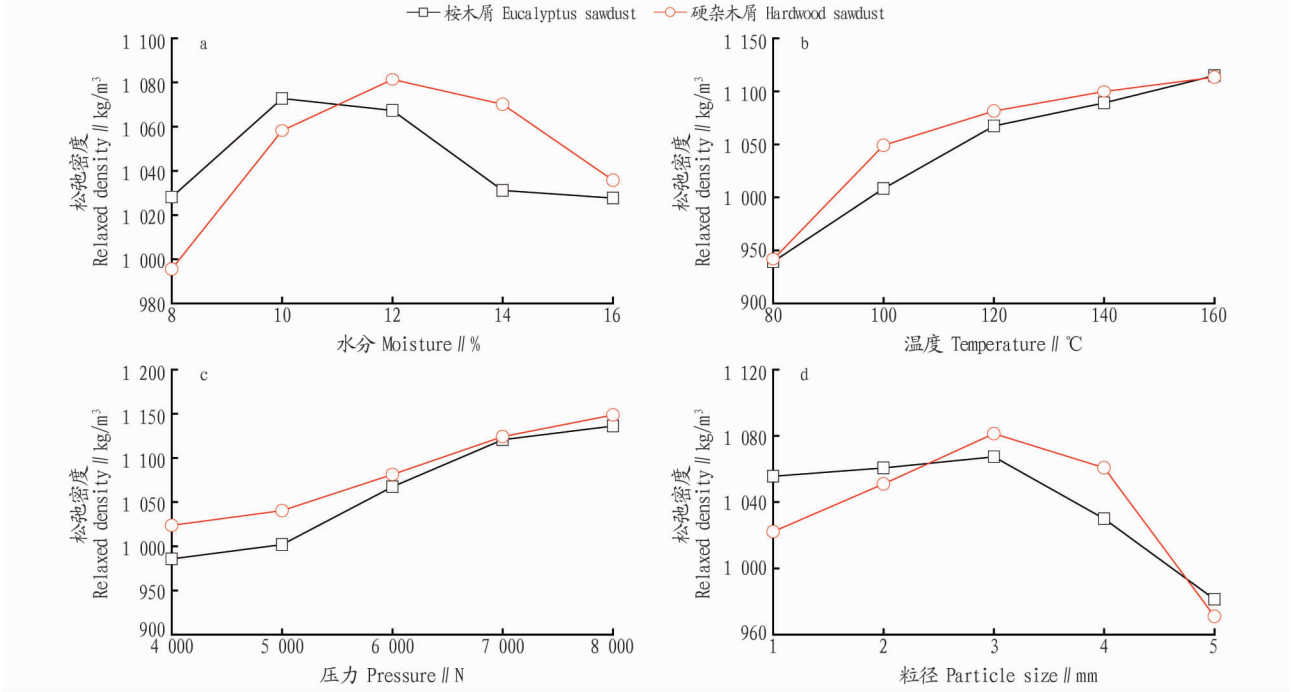


图 1 成型参数对桉木屑和硬杂木屑 RDS 的影响
Fig. 1 Effects of compression parameters on RDS of eucalyptus sawdust and hardwood sawdust

RDS 由 $1\,055.58\text{ kg/m}^3$ (粒径 1 mm) 先增大到 $1\,067.38\text{ kg/m}^3$ (粒径 3 mm), 增大了 1.12% , 再减小到 981.34 kg/m^3 , 减小了 8.06% , 桉木屑与硬杂木屑 RDS 相差最大比例为 3.27% (粒径 1 mm)。

结果表明, 温度和压力提高, RDS 增大; 水分和粒径增大, RDS 先增大后减小, 水分 10% 、粒径 3 mm 时, 桉木屑颗粒 RDS 分别达到最大。相同成型条件下, 桉木屑与硬杂木屑颗粒 RDS 相差不大。

2.2 SEC 图 2 为成型参数对 SEC 的影响。由图 2a 可知, 水分增加, SEC 减小, 桉木屑 SEC 由 36.22 kJ/kg (水分 8%) 减小到 25.31 kJ/kg (水分 16%), 减小了 30.12% , 桉木屑与硬杂木屑 SEC 相差最大比例为 45.98% (水分 16%)。由图 2b 可知, 温度提高, SEC 增大, 桉木屑 SEC 由 11.96 kJ/kg (温

度 $80\text{ }^{\circ}\text{C}$) 增大到 36.57 kJ/kg (温度 $160\text{ }^{\circ}\text{C}$), 增大了 205.77% , 桉木屑与硬杂木屑 SEC 相差最大比例为 57.73% (温度 $80\text{ }^{\circ}\text{C}$)。由图 2c 可知, 压力增大, SEC 提高, 桉木屑 SEC 由 24.91 kJ/kg (压力 $4\,000\text{ N}$) 增大到 38.28 kJ/kg (压力 $8\,000\text{ N}$), 增大了 53.67% , 桉木屑与硬杂木屑 SEC 相差最大比例为 58.04% (压力 $8\,000\text{ N}$)。由图 2d 可知, 粒径增大, SEC 先减小再增大, 桉木屑 SEC 由 30.75 kJ/kg (粒径 1 mm) 减小到 29.04 kJ/kg (粒径 3 mm), 减小了 5.56% , 再增大到 36.25 kJ/kg (粒径 5 mm), 增大了 24.83% , 桉木屑与硬杂木屑 SEC 相差最大比例为 40.00% (粒径 4 mm)。

结果表明, 温度和压力提高, SEC 增大, 水分增加, SEC 降低; 粒径增大, SEC 先减小再增大, 粒径 3 mm 时桉木屑 SEC 最小。相同成型条件下, 桉木屑 SEC 明显高于硬杂木屑。

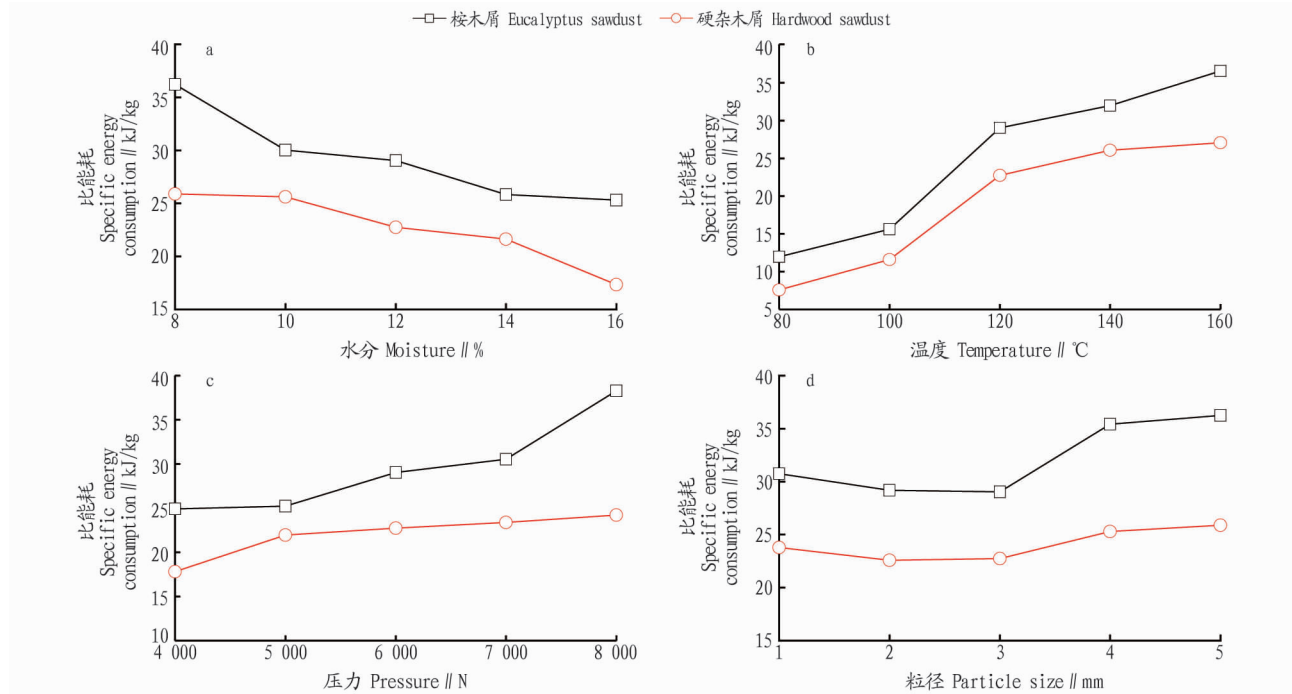


图 2 成型参数对桉木屑和硬杂木屑 SEC 的影响

Fig. 2 Effects of compression parameters on SEC of eucalyptus sawdust and hardwood sawdust

2.3 H_M 图 3 为成型参数对 H_M 的影响。由图 3a 可知, 水分增加, H_M 先增大后减小, 桉木屑颗粒 H_M 由 13.39 N/mm^2 (水分 8%) 增大到 14.07 N/mm^2 (水分 12%), 增大了 5.08% , 再降低到 13.03 N/mm^2 (水分 16%), 减小了 7.39% , 桉木屑与硬杂木屑颗粒 H_M 相差最大比例为 -41.52% (水分 8%)。由图 3b 可知, 温度提高, H_M 增大, 桉木屑颗粒 H_M 由 11.77 N/mm^2 (温度 $80\text{ }^{\circ}\text{C}$) 增大到 16.31 N/mm^2 (温度 $160\text{ }^{\circ}\text{C}$), 增大了 38.57% , 桉木屑与硬杂木屑颗粒 H_M 相差最大比例为 -40.32% (温度 $80\text{ }^{\circ}\text{C}$)。由图 3c 可知, 压力增大, H_M 增大, 桉木屑颗粒 H_M 由 11.00 N/mm^2 (压力 $4\,000\text{ N}$) 增大到 16.67 N/mm^2 (压力 $8\,000\text{ N}$), 增大了 51.62% , 桉木屑与硬杂木屑颗粒 H_M 相差最大比例为 -37.33% (压力 $6\,000\text{ N}$)。由图 3d 可知, 粒径增大, H_M 先增大再减小, 桉木屑颗粒 H_M 由 9.66 N/mm^2 (粒径 1 mm) 增加到 14.07 N/mm^2 (粒径 3 mm), 增加了 45.65% , 再减小到 7.79 N/mm^2 (粒径

5 mm), 减小了 44.63% , 桉木屑与硬杂木屑颗粒 H_M 相差最大比例为 -64.29% (粒径 5 mm)。

结果表明, 温度和压力增加, H_M 增大, 水分和粒径增加, H_M 先增大后减小, 水分 12% 、粒径 3 mm 时, 桉木屑颗粒 H_M 最大。相同成型条件下, 桉木屑颗粒 H_M 明显低于硬杂木屑。

由以上分析可知, 水分 $12\% \sim 14\%$ 、温度 $100 \sim 120\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、压力 $5\,000 \sim 6\,000\text{ N}$ 、粒径 $2 \sim 3\text{ mm}$ 时, 桉木屑及硬杂木屑颗粒 $RDS \geq 1\,000\text{ kg/m}^3$ 、SEC 适中、 H_M 较高, 是较佳的成型参数范围。但是, 相同成型条件时, 桉木屑颗粒 RDS 与硬杂木屑相差不大, 但 SEC 明显高于硬杂木屑、颗粒 H_M 明显低于硬杂木屑, 说明虽然 2 种原料较佳的生产条件基本一致, 但是在 RDS 相差不大的情况下, 压缩桉木屑时所消耗能量较大, 成型后桉木屑颗粒的强度较低, 现有成熟的硬杂木屑生产设备直接生产桉木屑原料存在电机不匹配及模具压缩比调整的问题。为了降低桉木屑成型能耗、提高颗粒强度及提高现有

生产设备的原料适应性,可采用与现有硬杂木屑混配成型的方式,以提高成型效果。

一般认为生物质压缩成型主要是利用原料中木质素的软化黏结作用,木质素含量越高,原料越易成型,成型效果越

好^[17]。该研究发现,虽然桉木屑与硬杂木屑木质素含量相差不大(表1),但2种原料成型效果相差较大,这说明成型效果不但与木质素含量有关,原料其他组分含量和结构对成型效果也有很大影响。

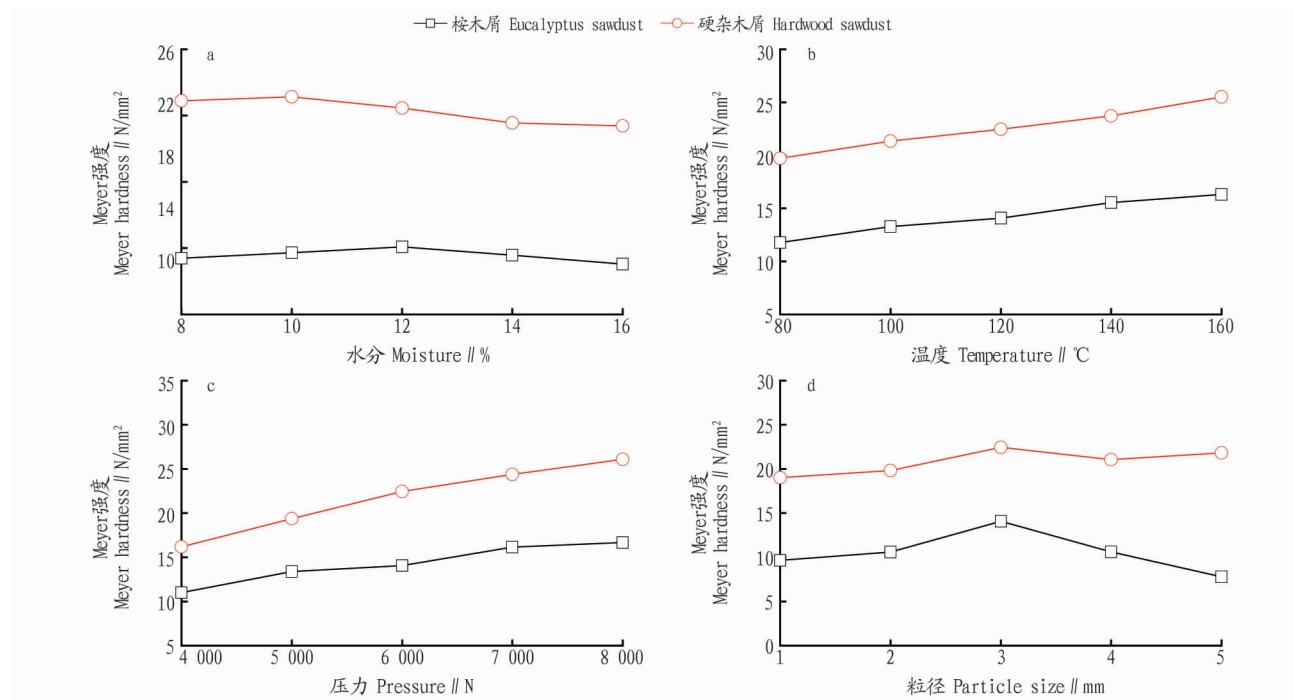


图3 成型参数对桉木屑和硬杂木屑 H_M 的影响

Fig. 3 Effects of compression parameters on H_M of eucalyptus sawdust and hardwood sawdust

3 结论及建议

为了研究桉木屑是否适应于成型燃料生产,考察了水分、温度、压力、粒径4个参数对比能耗、松弛密度、Meyer强度的影响,同时,以现有应用成熟的天然林硬杂木屑为参照物,对比2种原料成型特性的差异,主要结论如下。

(1) 桉木屑及硬杂木屑较佳的成型参数范围是水分12%~14%、温度100~120℃、压力5 000~6 000 N、粒径2~3 mm。

(2) 相同成型条件时,桉木屑颗粒RDS与硬杂木屑相差不大,但SEC明显高于硬杂木屑,最大相差比例58.04%(压力8 000 N),颗粒 H_M 明显低于硬杂木屑,最大相差比例64.29%(粒径5 mm)。

(3) 为了降低桉木屑成型能耗、提高颗粒强度及提高现有生产设备的原料适应性,可采用与现有硬杂木屑混配成型的方式,以提高成型效果。

参考文献

- [1] 李大中,李晓江. 木屑、稻壳和煤混合型煤压缩成型过程建模与工况优化[J]. 农业机械学报,2012,43(4): 83-87.
- [2] 杨华,刘石彩,赵佳平,等. 生物质棒状成型燃料的物理特性研究[J]. 中南林业科技大学学报,2015,35(2): 114-118.
- [3] 罗志华,苏超杰. 木屑生物质致密成型燃料的差热分析[J]. 黑龙江科技信息,2013(22): 273-274.
- [4] 许洁,袁振宏,姜洋,等. 基于学习曲线的生物质成型燃料补贴政策研

- 究[J]. 林产化学与工业,2016,36(2): 134-138.
- [5] 谢耀坚. 中国桉树育种研究进展及宏观策略[J]. 世界林业研究,2011,24(4): 50-54.
- [6] 温玉丛. 广东博罗桉树商品林的现状分析与可持续发展对策[J]. 中国林业产业,2016(4): 204.
- [7] 任忠秀,包雪梅,于家伊,等. 我国桉树人工林施肥现状、存在问题及对策[J]. 桉树科技,2013,30(4): 52-59.
- [8] 陈少雄,陈小菲. 我国桉树经营的技术问题与思考[J]. 桉树科技,2013,30(3): 52-59.
- [9] SLUITER A, HAMES B, RUIZ R, et al. Determination of structural carbohydrates and lignin in biomass [M]//Laboratory Analytical Procedure (LAP). Golden, CO: National Renewable Energy Laboratory, 2011.
- [10] TUMULURU J S, TABIL L, OPOKU A, et al. Effect of process variables on the quality characteristics of pelleted wheat distiller's dried grains with solubles[J]. Biosystems engineering, 2010, 105(4): 466-475.
- [11] 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.
- [12] KALIYAN N, MOREY R V. Densification characteristics of corn stover and switchgrass[J]. Transactions of the ASABE, 2009, 52(3): 907-920.
- [13] 田潇瑜,侯振东,徐杨. 玉米秸秆成型块微观结构研究[J]. 农业机械学报,2011,42(3): 105-108.
- [14] 张林海,侯书林,田宜水,等. 生物质固体成型燃料成型工艺进展研究[J]. 中国农机化,2012(5): 87-91,100.
- [15] 肖雷,姚菁华,万永周,等. 褐煤/生物质成型机理及工艺参数优化[J]. 中国矿业大学学报,2010,39(3): 352-356.
- [16] PENG J H, WANG J S, BI X T, et al. Effects of thermal treatment on energy density and hardness of torrefied wood pellets[J]. Fuel processing technology, 2015, 129: 168-173.
- [17] 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.