

农作物固体废弃物致密成型燃料能量学对比分析^{*}

陈龙健¹ 黄光群¹ 兴丽² 韩鲁佳¹

(1. 中国农业大学工学院, 北京 100083; 2. 中国农业机械化科学研究院, 北京 100083)

【摘要】 选取主要农作物固体废弃物为研究对象,综合考虑其热力学特性以及成型设备工程技术参数,对农作物的固体废弃物致密成型燃料与煤的能量学进行了比较研究。结果表明,对于秸秆类的固体废弃物致密成型燃料,由于其生产耗能高,仅当煤从生产地到使用地之间的输送距离超过4 000 km时,此类固体废弃物致密成型燃料与煤具有近似同等的能量竞争力;而对于果壳类的固体废弃物致密成型燃料,其生产耗能较低,临界输送距离较短。当煤从生产地到使用地之间的输送距离超过2 200 km时,基于果壳类的固体废弃物致密成型燃料比煤更有能量优势;当煤从生产地到使用地之间的输送距离处于1 500~2 200 km时,基于果壳类的固体废弃物致密成型燃料与煤具有近似同等的能量竞争力;当煤从生产地到使用地之间的输送距离小于1 000 km时,则基于果壳类的固体废弃物致密成型燃料失去了能量优势。

关键词: 农作物固体废弃物 致密成型 燃料 能量学

中图分类号: F323.21

文献标识码: A

Comparative Analysis on Energetics of Agro-residues Densification Briquetting Fuel

Chen Longjian¹ Huang Guangqun¹ Xing Li² Han Lujia¹

(1. College of Engineering, China Agricultural University, Beijing 100083, China

2. Chinese Academy of Agricultural Mechanization Sciences, Beijing 100083, China)

Abstract

Based on thermodynamic properties of agro-residues and engineering parameters related to briquetting equipment, the energetics of densification briquetting fuel from main agro-residues in China was compared with that of coal. The results indicated that energy required for producing densification briquetting fuel from agro-residues straw is so high that this type of briquetting fuel had similar energetically advantageous to coal for locations at a distance of above 4 000 km. In contrast, densification briquetting fuel from agro-residues husk consumed lower energy consumption and had a smaller critical transport distance. More specifically, densification briquetting fuel from agro-residues husk was found to be more energetically advantageous, similar energetically advantageous, and less energetically advantageous than coal for locations at a distance of above 2 200 km, between 1 500 and 2 200 km, and below 1 000 km from the coal pithead, respectively.

Key words Agricultural residues, Densification, Fuels, Energetics

引言

农作物固体废弃物致密成型燃料技术是将农作物秸秆、农作物加工剩余物等固体生物质原料经脱

水、粉碎、压缩成致密生物质燃料,从而提高其运输和贮存能力,改善其燃烧性能,提高利用效率,扩大应用范围^[1]。与其他能源化技术(气化,液化,碳化,生物质混合煤)相比,农作物固体废弃物致密成

型燃料技术更简便、实用。

对农作物固体废弃物致密成型燃料技术的研究已经引起了国内外学者的高度关注^[2~7],但目前国内针对农作物固体废弃物致密成型燃料能量学的相关研究未见文献报道。本文以国内主要农作物的固体废弃物为研究对象,在综合考虑其热力学特性及成型设备工程技术参数的基础上,对农作物固体废弃物致密成型燃料与煤的能量学进行比较研究,从能量学角度为农作物固体废弃物致密成型燃料产业发展的地域选择提供理论指导。

1 评价指标

1.1 模型

农作物固体废弃物致密成型燃料的能量学评价由 Purohit 等在 2006 年首次提出^[8],以能源产品消耗能量与产出能量之比 P_{PEI} 来评价其能源利用效率。 P_{PEI} 值越小,表示单位产出能量所消耗能量越少,能源利用效率越高。能源产品消耗能量包含能源产品生产过程中所消耗的能量 P_{EIP} (MJ/t) 和能源产品运输过程中(从生产地到使用地)所消耗的能量 P_{EIT} (MJ/t)。 P_{PEI} 计算式为

$$P_{PEI} = \frac{P_{EIP} + P_{EIT}}{P_{EIU}} \quad (1)$$

$$\text{其中} \quad P_{EIT} = D_t P_{EIFTt} \quad (2)$$

$$P_{EIU} = C_{CV} \eta \quad (3)$$

式中 P_{EIU} ——能源产品有效产出能量, MJ/t

D_t ——运输距离, km

P_{EIFTt} ——每吨能源产品运输每千米所消耗的能量, MJ/(t·km)

C_{CV} ——能源产品热值, MJ/t

η ——燃烧效率

煤因其运输方便、储量丰富,从而成为中国应用最为广泛的能源。从能量学角度出发,农作物固体废弃物致密成型燃料比煤更具有能量利用优势的前提是,农作物固体废弃物致密成型燃料的 P_{PEIb} 低于煤的 P_{PEIc} , 即

$$P_{PEIc} \geq P_{PEIb} \quad (4)$$

将式(1)~(3)代入式(4),可得

$$\frac{P_{EIPc} + D_{tc} P_{EIFTtc}}{C_{CVc} \eta_c} \geq \frac{P_{EIPb} + D_{tb} P_{EIFTtb}}{C_{CVb} \eta_b} \quad (5)$$

式中下标 c 表示煤,下标 b 表示农作物固体废弃物。

由式(5)可以计算出煤的临界输送距离 D_{tcc} (km)

$$D_{tcc} = \frac{1}{P_{EIFTtc}} \left[\frac{C_{CVc} \eta_c}{C_{CVb} \eta_b} (P_{EIFTtb} D_{tb} + P_{EIPb}) - P_{EIPc} \right] \quad (6)$$

1.2 模型参数

式(6)中涉及煤和农作物固体废弃物致密成型燃料的生产、运输耗能和其有效产能等多个参数,这些参数取值可参考文献^[8]。在 Purohit 等研究中, P_{EIFTc} 、 P_{EIFTb} 、 P_{EIPc} 、 C_{CVc} 、 η_c 、 η_b 和 D_{tb} 被设定为 0.23 MJ/(t·km)、1.15 MJ/(t·km)、187.4 MJ/t、14 040 MJ/t、0.85、0.80 和 50 km。参数 P_{EIFTc} 和 P_{EIFTb} 分别基于火车和卡车运输方式而设置,取值符合目前国内生产实际。参数 P_{EIPb} 依赖于农作物固体废弃物致密成型加工时的理化指标(主要有农作物固体废弃物含水率、农作物固体废弃物加工尺寸等)。秸秆含水率过高,不仅影响压块成型率,而且易使成型燃料在贮存期间腐败变质,因此必须经过干燥工序。在本研究中,假设所有农作物固体废弃物经过自然晾晒达到干燥状态。农作物固体废弃物加工尺寸也是影响 P_{EIPb} 的重要参数,尺寸过大会导致压块成型困难,因此一般对茎秆类废弃物压块前进行粉碎处理,从而增加成型燃料生产过程中能耗。Purohit 等研究表明^[8],对于生产率 1 000 kg/h 的农作物固体废弃物致密成型燃料生产线,茎秆类废弃物压块加工耗能比颗粒状废弃物压块加工耗能约高 15%。基于国内农业生产较为分散现状,小型成型燃料生产线更符合实际,本研究中生产率被设定为 500 kg/h,在此生产率下不同种类农作物固体废弃物的成型燃料生产过程耗能如表 1 所示。参数 C_{CVb} 与农作物固体废弃物种类、部位密切相关,也被列在表 1 中^[9~10]。

表 1 农作物固体废弃物的热值 C_{CVb} 和压块加工耗能 P_{EIPb}

Tab.1 Heating value C_{CVb} and energy required for producing agro-residues briquette P_{EIPb}

农作物名称	废弃物部位	压块加工耗能 P_{EIPb} /MJ·t ⁻¹	热值 C_{CVb} /MJ·t ⁻¹
水稻	稻壳	659	15 670
	秸秆	1 345	16 280
小麦	秸秆	1 345	17 510
	秸秆	1 345	18 250
玉米	轴芯	1 147	18 770
	秸秆	1 345	17 460
花生	花生壳	659	18 640
油菜	油菜籽壳	659	19 000
	棉籽壳	659	16 420
棉花	棉籽壳	659	16 420
	秸秆	1 345	17 050
甘蔗	甘蔗渣	659	17 330

1.3 临界输送距离计算

选择主要农作物废弃物(水稻、小麦、玉米、大

豆、花生、油菜、棉花的秸秆部位和部分废弃物的果壳部位)为研究对象,综合考虑其热力学特性以及成型设备工程技术参数,根据式(6)计算临界输送距离。

2 结果与讨论

2.1 主要农作物固体废弃物产量及其分布

农作物固体废弃物的产量是发展农作物固体废弃物致密成型燃料产业的关键和基础。此外,由于农作物固体废弃物资源具有地域性特点,因此进行其产量计算时,还必须考虑地理分布因素^[11]。本研究以省市、自治区为单位进行计算。

由于农作物固体废弃物的产量 P_r 未列入国家有关部门统计范围,其产量通常由农作物产量 P_c 和农作物草谷比 R_{rc} 计算,即 $P_r = P_c R_{rc}$ 。 P_c 数据可从国家统计局年鉴获得^[12],农作物草谷比采用文献^[13]的数值。根据上述计算方法和数据,得到的中国主要农作物固体废弃物的产量分布情况如表 2 所示。数据显示了农作物固体废弃物致密成型燃料产业有重要的资源支持,除去用作肥料、饲料和工业原料的废弃物资源外,剩余 50% 可作为燃料使用,开发潜力巨大;同时,由于资源地理分布不均,发展农作物固体废弃物致密成型燃料产业应当因地制宜。

表 2 2006 年中国主要农作物固体废弃物产量和分布
Tab.2 Yield and distribution of main agro-residues in China in 2006

省、市、 自治区	主要农作物							合计
	水稻	小麦	玉米	大豆	花生	油菜	棉花	
北京	0.002	0.401	1.458	0.038	0.032	0	0.007	1.938
天津	0.077	0.695	1.516	0.039	0.011	0	0.326	2.664
河北	0.331	15.357	25.610	0.669	2.056	0.082	1.884	45.990
山西	0.005	3.375	12.952	0.416	0.037	0.014	0.353	17.152
内蒙古	0.409	1.947	21.834	1.568	0.043	0.514	0.007	26.321
辽宁	2.664	0.087	22.774	0.494	0.535	0.003	0.006	26.563
吉林	3.071	0.040	39.680	1.821	0.493	0	0.008	45.114
黑龙江	7.510	1.242	24.460	8.940	0.084	0.002	0	42.239
上海	0.559	0.151	0.054	0.027	0.006	0.098	0.006	0.901
江苏	11.169	10.926	3.944	0.806	1.002	2.988	1.144	31.978
浙江	4.402	0.327	0.560	0.453	0.074	0.836	0.072	6.725
安徽	8.143	12.916	5.958	1.875	1.274	3.316	1.225	34.706
福建	3.170	0.025	0.262	0.276	0.375	0.036	0	4.144
江西	11.008	0.027	0.122	0.270	0.482	0.857	0.285	13.050
山东	0.664	25.248	35.226	0.932	5.325	0.053	3.069	70.517
河南	2.658	37.711	28.902	0.974	5.512	1.695	2.490	79.942
湖北	9.500	3.249	4.166	0.578	0.876	4.142	1.346	23.857
湖南	14.452	0.175	2.744	0.639	0.496	2.298	0.744	21.548
广东	6.880	0.023	1.258	0.297	1.148	0.018	0	9.623
广西	7.243	0.024	3.960	0.456	0.858	0.124	0.004	12.670
海南	0.900	0	0.112	0.017	0.131	0	0	1.160
重庆	2.376	1.007	4.122	0.176	0.107	0.645	0	8.433
四川	8.323	5.865	10.224	0.590	0.706	3.379	0.047	29.134
贵州	2.786	0.995	6.780	0.239	0.112	1.621	0.002	12.534
云南	4.057	1.471	9.042	0.203	0.087	0.631	0.001	15.491
西藏	0.004	0.354	0.034	0.003	0	0.109	0	0.504
陕西	0.538	5.554	8.870	0.635	0.123	0.584	0.261	16.564
甘肃	0.025	3.483	4.372	0.197	0.002	0.534	0.383	8.995
青海	0	0.514	0.016	0	0	0.526	0	1.056
宁夏	0.442	1.011	2.430	0.024	0	0	0.001	3.908
新疆	0.376	5.363	7.528	0.306	0.008	0.195	6.566	20.341
合计	113.743	139.563	290.970	23.958	21.995	25.300	20.237	635.761

2.2 参数 C_{CVb} 与 P_{EIPb} 对临界输送距离 D_{icc} 的影响

通过 Matlab 软件中 surf 函数, 根据式(6)建立参数 C_{CVb} 与 P_{EIPb} 对临界输送距离的影响(图 1)。临界输送距离 D_{icc} 随着 C_{CVb} 增加而减少, 随着 P_{EIPb} 增加而增加。从图 1 还可以观察到: 当 P_{EIPb} 值较小时, C_{CVb} 对临界输送距离影响较大; 当 P_{EIPb} 值较大时, C_{CVb} 对临界输送距离影响较小。

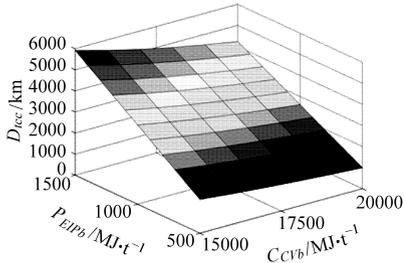


图 1 C_{CVb} 和 P_{EIPb} 对 D_{icc} 的影响

Fig. 1 Influence of C_{CVb} and P_{EIPb} on D_{icc}

分析了 D_{icc} 模型的参数敏感性。 C_{CVb} 取值范围为 15 670 ~ 19 000 MJ/t, 其均值为 17 335 MJ/t。 P_{EIPb} 取值范围为 659 ~ 1 345 MJ/t, 其均值为 1 002 MJ/t。在保持其他参数不变的情况下, 使参数 C_{CVb} 和 P_{EIPb} 单独变化, 单个参数对 D_{icc} 影响程度采用敏感系数计量(敏感系数为目标值变动百分比除以参量值变动百分比)。结果显示, 参数 P_{EIPb} 的敏感系数为 1.16, 大于参数 C_{CVb} 的敏感系数 1.05。

2.3 煤的临界输送距离 D_{icc}

煤的临界输送距离反映了一个地区发展农作物固体废弃物致密成型燃料能量优势。具体来说, 当煤成品从生产地输送到该地区的距离超过临界输送距离时, 则表明在该地区发展农作物固体废弃物致密成型燃料产业比煤更有能量优势; 当煤成品从生产地输送到该地区的距离与临界输送距离相似时, 则说明农作物固体废弃物致密成型燃料在这些地区与煤具有近似同等的能量竞争力; 当煤成品从生产地输送到使用地的距离小于临界输送距离时, 则意味着在该地区发展农作物固体废弃物致密成型燃料失去了能量优势。

虽然中国煤炭资源丰富, 但是地理分布很不均衡。国内煤炭资源主要分布于北方和西北地区, 其中新疆、内蒙、山西 3 省的煤炭资源约占全国煤炭资源的 70%, 而煤炭主要消费地则来自于东南沿海各省市, 因此距离制约成为“北煤南用”的一个重要瓶颈, 这也为农作物固体废弃物致密成型燃料产业的发展提供了机遇。基于不同农作物固体废弃物的临界输送距离如表 3 所示。对于果壳类固体废弃物, 由于其生产耗能较低 ($P_{EIPb} = 659$ MJ/t), 因此临界输送距离较小 ($D_{icc} \approx 1\ 500 \sim 2\ 200$ km); 而对于秸秆

类固体废弃物, 生产耗能较高 ($P_{EIPb} = 1\ 345$ MJ/t), 导致临界输送距离高达 4 000 km。基于中国地域和煤炭资源分布特点, 从能量学角度可以推断在绝大部分地区发展秸秆类固体废弃物致密成型燃料产业的可行性较低, 但发展果壳类的固体废弃物致密成型燃料产业具有较强的可行性。例如, 从山西运煤到贵州、福建、云南、广东和广西各省市的距离均大于基于果壳类的固体废弃物致密成型燃料所估计的临界输送距离 ($D_{icc} \approx 1\ 500 \sim 2\ 200$ km); 对于其他部分东部沿海和内陆省市, 如安徽、重庆、江西、上海、四川、湖南、浙江, 山西煤运输距离与临界输送距离相似, 这说明基于果壳类的固体废弃物致密成型燃料在这些地区与煤具有近似同等的能量竞争力。

表 3 基于不同农作物固体废弃物的煤的临界输送距离估计

Tab. 3 Estimates for critical transportation distance based on different agro-residues

农作物名称	废弃物部位	临界输送距离 D_{icc} /km
水稻	稻壳	2 151
	秸秆	4 773
小麦	秸秆	4 380
玉米	秸秆	4 170
	轴芯	3 347
大豆	秸秆	4 395
花生	花生壳	1 678
油菜	油菜籽壳	1 631
棉花	棉籽壳	2 015
	秸秆	4 520
甘蔗	甘蔗渣	1 867

3 结束语

对于秸秆类的固体废弃物致密成型燃料, 由于其生产耗能高, 仅当煤从生产地到使用地之间的输送距离超过 4 000 km 时, 此类固体废弃物致密成型燃料与煤具有近似同等的能量竞争力; 而对于果壳类的固体废弃物致密成型燃料, 其生产耗能较低, 临界输送距离较短。当煤从生产地到使用地之间的输送距离超过 2 200 km 时, 基于果壳类的固体废弃物致密成型燃料比煤更有能量优势; 当煤从生产地到使用地之间的输送距离处于 1 500 ~ 2 200 km 时, 基于果壳类的固体废弃物致密成型燃料与煤具有近似同等的能量竞争力; 当煤从生产地到使用地之间的输送距离小于 1 000 km 时, 则基于果壳类的固体废弃物致密成型燃料失去了能量优势。应当指出本研究结论是基于能量学角度分析而获得, 并未考虑农

作物固体废弃物致密成型燃料产业的经济效应、环境效应等因素。此外,基于能量学的农作物废弃物

的加工耗能仅考虑了耗能最大的压块加工,对脱壳等其他加工耗能尚未计入,还有待进一步研究。

参 考 文 献

- 1 樊峰鸣. 我国农村秸秆成型燃料规模化技术研究[D]. 郑州:河南农业大学, 2005.
Fan Fengming. Studies on scale business of straw densification briquetting fuels in China's rural areas[D]. Zhengzhou: Henan Agricultural University, 2005. (in Chinese)
- 2 Kaltschmitt M, Weber M. Markets for solid biofuels within the EU-15[J]. Biomass and Bioenergy, 2006, 30(11):897~907.
- 3 Obernberger I, Thek G. Physical characterization and chemical composition of densified biomass fuels with regard to their combustion behaviour[J]. Biomass and Bioenergy, 2004, 27(6):653~669.
- 4 Zeng X, Ma Y, Ma L. Utilization of straw in biomass energy in China[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2007, 11(5):976~987.
- 5 张百良,李保谦,赵朝会,等. HPB-I型生物质成型机的试验研究[J]. 农业工程学报,1999,15(3):133~136.
Zhang Bailiang, Li Baoqian, Zhao Chaohui, et al. Test and research on HPB-I biomass briquetting machine[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 1999,15(3):133~136. (in Chinese)
- 6 杨明韶,王春光. 牧草压缩工程中几个主要问题分析[J]. 农业工程学报,1997,13(S1):134~138.
Yang Mingshao, Wang Chunguang. The analysing on essential problems in hay compressing engineering[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 1997,13(S1):134~138. (in Chinese)
- 7 范林,王春光,王洪波,等. 揉碎玉米秸秆可压缩性研究[J]. 农业机械学报,2008,39(11):76~80.
Fan Lin, Wang Chunguang, Wang Hongbo, et al. Study on the compressibility of maize straw rubbed[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2008,39(11):76~80. (in Chinese)
- 8 Purohit P, Tripathi A K, Kandpal T C. Energetics of coal substitution by briquettes of agricultural residues[J]. Energy, 2006, 31(8~9):1 321~1 331.
- 9 Gaur S, Reed T B. Thermal data for natural and synthetic fuels[M]. New York:Marcel Dekker, 1998.
- 10 Demirbas A. Calculation of higher heating values of biomass fuels[J]. Fuel, 1997, 76(5):431~434.
- 11 刘刚,沈镭. 中国生物质能源的定量评价及其地理分布[J]. 自然资源学报,2007,22(1):9~19.
Liu Gang, Shen Lei. Quantitative appraisal of biomass energy and its geographical distribution in China[J]. Journal of Natural Resource, 2007,22(1):9~19. (in Chinese)
- 12 国家统计局. 中国统计年鉴[M]. 北京:中国统计出版社,2007.
- 13 China MOA/DOE. Assessment of biomass resource availability in China[R]. Beijing:China Environmental Science Press, 1998.

(上接第 101 页)

- 16 Nelson S O. Frequency and temperature-dependent permittivities of fresh fruits and vegetables from 0.01 to 1.8 GHz[J]. Transactions of the ASAE, 2003, 46(2):567~574.
- 17 Nelson S O. Dielectric spectroscopy of fresh fruit and vegetable tissues from 10 to 1 800 MHz[J]. Journal of Microwave Power & Electromagnetic Energy, 2005, 40(1):31~47.
- 18 郭文川,郭康权,朱新华. 介电特性在番茄和苹果品种识别中的应用[J]. 农业机械学报,2006,37(8):130~132.
Guo Wenchuan, Guo Kangquan, Zhu Xinhua. Application of dielectric properties in identifying species of tomatoes and apples[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2006,37(8):130~132. (in Chinese)
- 19 叶齐政,姚宏霖,李黎,等. 根据水果阻抗的特性频率变化测定采后水果成熟度的方法[J]. 植物生理学通讯, 1999, 35(4):304~307.
Ye Qizheng, Yao Honglin, Li Li, et al. A method for measuring maturity according to the feature frequency of resistance of post-harvest fruits[J]. Plant Physiology Communications, 1999,35(4):304~307. (in Chinese)
- 20 朱新华,郭文川,郭康权. 电激励信号对果品电参数的影响[J]. 西北农林科技大学学报:自然科学版,2004,32(11):125~128.
Zhu Xinhua, Guo Wenchuan, Guo Kangquan. Influence of electric excitation signal on electric parameters of fruits[J]. Journal of Northwest A&F University: Natural Science Edition, 2004,32(11):125~128. (in Chinese)