

固体酒精生物炭燃料块的设计研究

景华键¹, 樊启洲², 祝浩东³, 于沁雷¹, 胡启豪¹, 赵国凤¹

1. 四川汽车职业技术学院, 四川 绵阳 621000

2. 华中农业大学, 湖北 武汉 430000

3. 浙江物产环保能源股份有限公司, 浙江 杭州 310000

DOI:10.61369/ERA.2025090038

摘 要 : 我国的生物质能分布广泛且数量多, 其中农业秸秆类废弃物占比较大, 但缺乏一种简单高效的处理和利用方式。本文针对农业秸秆类废弃物的处理与应用问题, 研制了一种能够缓解秸秆类废弃物处理压力的新型固体燃料—生物炭—酒精固体燃料块。

关 键 词 : 生物炭; 固体酒精; 燃烧温度; 火焰温度; 燃尽率; 掺炭

Design Research on Solid Alcohol Biochar Fuel Blocks

Jing Huajian¹, Fan Qizhou², Zhu Haodong³, Yu Qinlei¹, Hu Qihao¹, Zhao Guofeng¹

1. Sichuan Automotive Vocational and Technical College, Mianyang, Sichuan 621000

2. Huazhong Agricultural University, Wuhan, Hubei 430000

3. Zhejiang Wuchan Environmental Protection Energy Co., LTD., Hangzhou, Zhejiang 310000

Abstract : Biomass energy is widely distributed and abundant in China, among which agricultural straw waste accounts for a relatively large proportion. However, there is a lack of a simple and efficient treatment and utilization method. This paper focuses on the treatment and application of agricultural straw waste and has developed a new type of solid fuel – biochar – alcohol solid fuel block, which can relieve the pressure of straw waste treatment.

Keywords : biochar; solid alcohol; combustion temperature; flame temperature; burnout rate; carbon blending

引言

能源是人类生活必要的物质, 每个行业的发展也离不开能源。人类现在利用的能源以化石燃料居多, 但化石能源是有一定储量的, 如果按照当前的能源消耗速率计算, 那么将近200年左右, 化石燃料将被完全开采, 同时使用化石燃料对大气、土壤的污染是非常严重的, 会使温室效应加剧, 同时会带来自然灾害, 对人类生活造成威胁(莫松平等)^[1]。因此, 寻找一种清洁环保的能源来代替化石能源成为了当前世界能源界面临的首要问题(董福品, 孙风平)^[2-3]。生物质能作为煤、石油、天然气之后的存量最大的能源受到了各国研究者的关注(陈晓红等)^[4]。

一、绪论

能源是人类生活与发展的基石, 当前全球能源消费结构中化石燃料仍占主导, 但其储量有限且污染严重, 促使清洁能源的探索成为紧迫任务。生物质能作为第四大能源, 分布广泛且可再生, 受到广泛关注。中国作为能源消费大国, 化石燃料占比高, 清洁能源利用不足, 面临利用率低、污染重等挑战。因此, 研究并高效利用生物质能, 特别是农业秸秆废弃物, 对于缓解能源压力、保护环境具有重要意义。

(一) 生物炭制备及成型技术

1. 生物炭的原料情况

生物炭是生物质原料在缺氧高温下生成的稳定、高碳固体物

质, 其性能与产量深受原料种类影响, 固定碳含量高则产量大。常用原料包括木柴、秸秆等, 其中秸秆富含木质素、纤维素等, 热解温度在240–370℃间。木质素含量与生物炭产量呈正非线性相关, 且比表面积随木质素增加而增大, 故高木质素原料制炭效果更佳。

2. 生物炭制备技术进展

生物炭制备方法多样, 影响产量各异。炭化技术最常见, 通过控制加热温度、反应时间及升温速率, 分为慢速、中速、快速及闪速热裂解, 炭产率从12%到35%不等。气化热解法主要生成气体, 生物炭为副产物, 产率较低。水热炭化法在200–374℃下进行, 产出的生物炭含碳量高。快速炭化在300–600℃、1–2MPa条件下半小时完成。烘焙炭化则在200–300℃低温下,

限制氧气，转化原料为疏水性固体，但碳氧含量低，吸附力弱。

3. 生物炭固体成型技术进展

生物质成型燃料通过物理压缩生物质原料制成规则形状。针对生物炭固体成型燃料的研究，主要集中在制备、粘结剂选择和热值分析上。研究发现，压力在1-3MPa、含水率22%-40%、粘结剂添加量15%-40%时，成型性能较优。以木质素为粘结剂，按生物炭:水:木质素=10:3:1比例混合挤压效果佳。成型时，温度60-100℃、压力6-8kN、含水率15%-20%效果最好，淀粉添加剂效果更佳。

二、生物炭-酒精固体燃料块的研制及性能试验

(一) 研制目的及主要内容

本新型燃料以玉米秸秆炭、95%工业酒精及凝固剂为原料，制成特定形状的固体燃料块，旨在实现秸秆类农业废弃物的综合高值化利用。设计充分利用玉米秸秆炭与酒精特性，形成易点燃、燃烧时间长、便携的固体燃料。通过“公司+农户”模式，分发专利炭化炉给农户处理秸秆为生物质炭，公司收集后加工成能源商品，实现产业扶贫与生态保护双赢。同时，解决固体酒精燃料火势小、时间短等问题，研制出火势稳定、燃烧持久、可水扑灭的固体成型燃料。具体内容包括粉碎分筛炭粉探究粒径影响、不同比例掺炭探究成型与燃烧关系及燃烧特性试验分析。

(二) 燃料块的材料及研制方法

1. 燃料块材料

产品所使用的原材料为玉米秸秆炭、95%工业酒精、硬脂酸、氢氧化钠（片状）、水等。其中，产品所采用的玉米秸秆炭均以湖北省宜昌市长阳县当地所收获的玉米秸秆为原材料，将玉米秸秆进行热解炭化。其热解炭化终温为360℃~550℃，在达到热解温度后，加热时间为4-6小时。因其炭化终温不同，所以最后得到的玉米秸秆炭的各项数值会在一定范围内波动，炭产率在25%-38%之间，将炭化后的玉米秸秆炭粉碎研磨，制成玉米秸秆炭粉。

试验所采用的酒精是从华中农业大学物资分配中心购买体积分数为95%的工业酒精，沸点为78.5℃，热值为22.8 MJ/kg。试验中所采用的氢氧化钠为物资配送中心购买的试验室用氢氧化钠，其它材料均网购。

2. 设计路线及方法

燃料块的设计路线大致分为两个部分，第一部分是确定制作生物炭-酒精固体燃料块的原料配比，选择出一种硬度较高、能够掺混炭粉后不会稀软变形的配方。后加入不同配比、不同粒径的炭粉，在所选出的固体酒精的配方上，先选用一种粒径的炭粒，以炭粒的质量为变量，探究掺炭量对燃料块物理成型以及燃烧的影响，并得出该粒径下最好的掺炭量以及所制得的燃料块的基本性能数据；随后，在掺炭量的基础上，以玉米秸秆炭的炭粒径为变量，探究炭粒径对燃料块成型的影响，并得出最合适的炭粒径及所制得的燃料块的基本性能数据。第二部分是生物炭-酒精固体燃料块物理性能和燃烧性能的试验探究。主要参数包括强

度、硬度、炭粒分布、火焰温度、燃烧时间、燃尽率、热重分析和官能团分析。

(三) 生物炭-酒精固体燃料块的制备

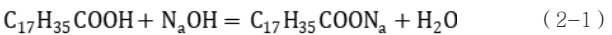
1. 固体酒精成型配方比较

通过查阅文献列出表2-2，对比不同的固化剂所制备而成的固体酒精的优缺点，最后出于经济性和产品性能的考虑，本产品采用硬脂酸钠作为固化剂。

表2-2 各种固化剂的优缺点

固化剂类型	优缺点
硬脂酸钠	成本较低，易得到，粘接性好
硝化纤维	需要溶剂溶解，成本较高
醋酸钙	需低温，固化效果差，易软化
乙基羧基乙基纤维素	工艺简洁，但价格昂贵

硬脂酸钠在常温条件下难溶于乙醇，而在60℃左右时，它可以均匀地分散在乙醇液体中，冷却后则形成凝胶体系，从而使酒精固定，生成固体状态的充斥着液体酒精的混合物。制作硬脂酸钠的原料来源十分之广泛，并且成本低廉。其反应原理如下：



通过查阅资料，产品选择了两种不同比例的固体酒精配方进行对比分析：

配方一：硬脂酸2.000 g，NaOH固体0.400 g，温度70℃，一次酒精用量40 mL，二次酒精用量50 mL（贾长英等2007）。配方二：硬脂酸6.500 g，NaOH固体1.000 g，反应温度60℃，一次酒精用量50.000 g，二次酒精用量42.500 g（张忠诚等2000）。

具体配置以配方二为例：在A烧杯用300g千分位天平称6.500g硬脂酸，加50.000g工业酒精；B烧杯放1.000g氢氧化钠、少量水及42.500g工业酒精。恒温水浴搅拌至固体消失，将A液倒入B液，快速搅拌后倒入容器。配方一混合后不立刻固化，室温下30min完成；配方二立即固化，需快速搅拌防不均，10min完成。冷却后观察，配方一透明但渗液多、强度低；配方二乳白、强度高。燃烧均融化，时间相近，配方二残渣多。考虑后续需掺炭粉，选强度高、渗出少的配方二，且其水浴60℃可减少酒精挥发。

2. 不同掺炭比的选择

多孔玉米秸秆炭可吸附酒精，微孔支撑成型并促进酒精扩散，增强对流传热，使炭粉易点燃。酒精既作燃料又作引燃剂，炭粉则吸收酒精、充当燃料并支撑燃料块。试验分析炭粉吸附性，确定掺炭量范围。具体制备：以100g固体酒精（不含5g水）为基础，加玉米秸秆炭。A烧杯加6.5g硬脂酸、50g酒精；B烧杯加1g氢氧化钠、5g水、42.5g酒精；C烧杯称取炭粉。恒温水浴搅拌A、B至固体消失，将C中炭粉倒入A，搅拌3分钟后倒入B液，再搅拌后倒入器皿冷却。预试验选0.2-0.3mm粒径炭粉，5g为梯度增加掺炭量，发现掺炭量超30g固化时间变长，强度减弱，50g时难以搅拌，故正式试验掺炭量设0-50g，梯度扩大，设置6组试验，炭粒径0.2-0.3mm。

3. 不同炭粒直径的选择

粒径影响炭粉对酒精的吸附量和燃料燃烧状态，故设探究试

验。预试验发现, 粒径大于0.4mm 时, 40g 玉米秸秆炭难保持流体状态, 搅拌不利, 且燃料块切割面粗糙、孔隙多、易散落。因此试验选用0.4mm 以下粒径。进一步分离出0-0.1mm、0.1-0.2mm、0.2-0.3mm、0.3-0.4mm 粒径炭粉制备燃料, 发现小粒径差异小, 0.3-0.4mm 粒径提前凝固难搅拌。考虑实际, 后续产品只需过60目筛(0.28mm)即可。

(四) 生物炭-酒精固体燃料块的物理性能试验

1. 试验前期准备

试验所用的不同炭含量的燃料块制作在华中农业大学工科基地完成, 关于强度和硬度的测量在工程楼进行。

试验采用的玉米秸秆炭作为原材料, 通过粉碎机粉碎成炭粉, 为了能得到具有矩形形状的成型块产品, 需过60目的筛, 得到粒径约为0.25 mm 的炭粒细粉。

炭粉加工设备: 高速多功能粉碎机、网筛(60目)和水浴锅。硬度及强度测定仪器: 邵氏硬度计(0~100 HA), 精度为0.5 HA; TMS-PRO 质构仪。

2. 试验因素及指标选择

燃料块的机械力学性能对燃料块长久固定成型有很大的影响, 固体的强度和硬度越高, 其耐磨性和耐腐蚀性就越好, 抗变形的能力就越强。

为了探究不同掺炭量对燃料块固定成型的影响, 设置单因素实验, 影响因素设置为酒精块中炭粉的含量, 其他成分的含量保持不变, 选取的评价指标为可以直接计算或者测量的成型后的截面炭粒分布、抗压强度和硬度, 研究掺炭量对燃料块机械力学性能的影响(Kumar SV et al 2020)。每个燃料块重复进行5次测定并取平均值, 公式为:

$$P = \frac{F}{S} \quad (2-2)$$

其中, P 为燃料块的抗压强度, 单位 MPa;

F 为燃料块产生挤压变形时的最大压力, 单位 N;

S 为挤压的表面积, 单位 mm²。

3. 含炭量对指标的影响分析

炭含量是影响生物炭-酒精固体燃料块成型的重要因素。在0~40g 掺炭量范围内, 燃料块抗压强度和硬度随炭量增加而增大, 40g 时达到最大值(抗压强度0.815MPa, 硬度12.5HA), 此时断面炭粒分布均匀, 无明显分层和散落。超过40g 后, 强度和硬度显著下降, 因过多炭粉增加了固化负荷, 减少黏结力。故生物炭与酒精按4:10比例混合时, 燃料块成型效果最佳。

(五) 生物炭-酒精固体燃料块的燃烧性能试验

1. 试验前期准备

试验所用的不同炭含量的燃料块在华中农业大学工科基地制作完成, 燃烧时间、燃烧温度、燃尽率、燃烧热值等测量试验在工科基地完成, 关于燃烧时的热重测量和燃料官能团测量在工程楼进行。

本试验中, 用电子测温仪测量温度, 范围为0-1200℃, 精度为0.1℃; 用电子天平测量质量, 精度为0.001g; 热重测量仪器

为SDT-600同步热分析仪; 结构测试仪器为傅里叶红外转换光谱仪; 热值测量仪器为微机全自动量热仪。

2. 试验因素及指标选择

燃料的燃烧特性和动力学方面的参数是评价生物质炭燃料品质的重要依据, 是生物炭燃料配套燃烧设备的设计和开发不可或缺的理论依据, 同时也是燃烧方式进行优化的重要依据。为了探究不同掺炭量下燃料块的燃烧特性, 设置单因素为玉米秸秆炭的含量, 其他成分的含量保持不变, 选取的评价指标为可以直接计算或者测量的炭含量、火焰不同部位的温度、燃尽率、失重率、燃烧时间等, 由此研究掺炭量对燃料块燃烧性能的影响。

3. 含炭量对燃料块燃烧特性的影响

掺炭量从0g 到50g 递增时, 燃料块燃烧熔融现象逐渐减弱, 炭含量减少。0g 时熔融最明显, 40g 时能维持原始矩形状态。熔融因硬脂酸钠熔化、酒精流淌所致; 炭含量则因酒精气化产生气泡, 熔融状态下炭粒孤立易被挤出。随炭量增加, 固化剂作用转变, 炭粒吸附酒精增多, 外部酒精减少, 流动力减小, 炭粒堆积使熔融减弱; 外部酒精少, 气化不产生大量气泡, 炭粒紧密使炭含量减少, 这表明炭量增加能加强固化效果, 使结构更紧密。含炭量还影响火焰温度及燃烧时间, 生物炭酒精块燃料燃烧分剧烈燃烧、稳定固液混燃、阴燃三阶段, 各阶段燃烧特征及持续时间不同。

切取10 g 左右不同掺炭量条件下制作出来的生物炭-酒精固体燃料块, 在火焰不同高度取三个位置进行温度测量, 分别取底部接近燃料块处、内焰处和外焰处, 然后用电子测温仪进行温度测量, 每个部位测量5次求取平均值, 同时记录燃烧时长。

火焰温度纵向对比, 外焰最高, 内焰次之, 底部最低。横向看, 0~40g 掺炭量范围内, 火焰温度随掺炭量增加而升高, 40g 左右达峰值后降低。底部火焰温度325℃~557℃, 内焰648℃~788℃, 外焰773℃~925℃, 均在40g 左右达最大值。随掺炭量增加, 燃料块明火燃烧时间先增后减, 0g 时为3.9min, 40g 时最长, 与最短相差6min, 50g 时下降。0g、10g 时炭量少, 酒精游离多, 燃烧快; 20g~40g 时炭粒吸附酒精多, 外部酒精少, 气化慢, 且炭粒起骨架作用, 燃烧时间延长; 50g 时酒精含量减少, 炭粉引燃不充分, 整体燃烧时间缩短。

不同含炭量的燃料块, 其燃尽率具有差异。关于燃尽率的计算, 需通过电子天平测量燃料燃烧前后的质量, 其计算公式为:

$$\text{燃尽率 } \rho = \frac{M_1 - M_2}{M_1} \times 100\% = \frac{M_1 - M_2}{M_1} \times 100\% \quad (2-3)$$

其中, M₁是燃烧前所切取的燃料块重量, 单位为g;

M₂为燃烧后的灰烬余量, 单位为g;

ρ 为燃尽率, 单位为%。

掺炭量从10g 增至40g, 燃尽率逐渐增大, 40g 后增幅减小趋于稳定。10g 纯固体酒精燃尽率约91.5%, 40g 时达92.6%。掺炭量少时燃烧熔融, 炭粒平摊难燃尽, 灰烬余量多; 炭量足时燃烧充分, 灰烬多为灰分, 质量轻。掺炭量增加可改变燃烧状态, 使炭粉燃烧更充分, 提高燃尽率。热重试验以20℃/min 升温至600℃, 空气为介质, 结果显示固体酒精与生物炭失重区间无交

集，酒精100℃前挥发完，生物炭300℃左右燃烧。炭比例越大燃烧残留物越多，但1:10与2:10配比燃料块残留物少于纯固体酒精，说明炭燃烧可促进固化剂分解，固化剂使炭失重起点前移，提高对流换热效率。

对不同含炭量燃料块进行耦合试验，耦合值为理论值，与实际测量值有误差。本试验按生物炭与酒精不同掺混比，将两者热重数据按比例混合，探究混合燃烧优缺点。对比发现，理论失重量大于实际失重量，表明二者充分混合燃烧可降低残余物质量；且随炭比例增多，酒精挥发量也增多。

三、结论

本文探究不同含量生物炭与酒精掺混比对燃料物理成型及燃烧性能的影响，并借助热重等技术分析燃烧情况。（1）物理性能

试验中，含炭量40g左右时燃料块成型最佳；燃烧性能试验中，生物炭与酒精比例小于3:10时燃料燃烧会融化。（2）燃料完全燃烧分三阶段，酒精与炭燃烧失重区间不同，混合物可减少残余物，混合燃烧气体成分与分别燃烧相同。（3）生物炭与酒精4:10为最佳比例，最优配方为：60目玉米秸秆炭40g，两次酒精共92.5g，氢氧化钠1g等。

参考文献

-
- [1] 莫松平, 陈颖. 新能源技术现状与应用前景. 广东: 广东经济出版社, 2015. 3-19.
 - [2] 董福品. 可在生能源概论. 北京: 中国环境出版社, 2013. 162-195.
 - [3] 孙风平. 生物质锅炉燃烧技术及案例. 北京: 中国电力出版社, 2014. 1-17.
 - [4] 陈晓红, 王智勇, 毛天宇. 生物质成型燃料产业现状与发展前景 [J]. 中国资源综合利用, 2018, 36(06): 83-85.