

秸秆气固燃料二元联产的可行性与经济性研究

赵胜雪¹, 赵越¹, 康可新², 王明^{3,4}

(1.黑龙江八一农垦大学工程学院, 大庆163316; 2.黑龙江瑞丰盈现代农业科技有限公司, 哈尔滨150010; 3.华中农业大学工学院, 武汉430070; 4.农业部长江中下游农业装备重点实验室, 武汉430070)

摘要:以玉米秸秆和水稻秸秆为研究对象, 通过测定二者厌氧发酵后的沼气、沼渣产量及热值, 探讨秸秆气固燃料二元联产的综合能源利用效率与经济效益。结果表明, 由于发酵后秸秆沼渣中木质素含量增大, 沼渣热值也有所增大; 沼渣成型燃料密度、机械耐久性等特性均优于原秸秆; 秸秆气固燃料二元联产综合能源利用效率较秸秆直接燃烧可提高40%~50% (以发电量计); 因免除收集、运输和粉碎等成本, 秸秆沼渣生产成型燃料的综合成本较秸秆压块单独生产模式可节省46.4%。

0引言

在众多秸秆处理方向中, 能源化处理一直倍受关注, 这主要源自于化石能源的不可再生和全球日益紧张的能源危机问题。利用

厌氧发酵法将秸秆转化

成甲烷和直接将秸秆压缩成型作为固体燃料均

是秸秆能源化的重要途径^[1,2]

。然而, 因秸秆中半纤维、纤维素与木质素三者在植物细胞壁中以相互缠绕的聚集体形式存在, 很难被微生物降解利用。因此, 秸秆在进行沼气发酵后仍残留进料质量约50%的残渣 (俗称秸秆沼渣), 其成分以木质素和结晶纤维素为主。秸秆沼渣的处理及应用一直是影响秸秆沼气工程快速发展的重要问题之一。目前对秸秆沼渣的处理及利用方式多种多样, 如与畜禽粪污混合堆肥、制作育苗基质和栽培食用菌等。然而, 这些对秸秆沼渣的处理方式受地域、资源及生产需求的影响, 处理能力十分有限, 均难以满足大规模沼气工程秸秆沼渣的处理需要。

生物质固体燃

料是在一定物理条件下, 将农林

废弃物压缩成型, 制成热值高、燃烧充分的环保原料^[2]

。秸秆也可用于成型燃料的生产, 但因收集、运输和粉碎等过程的复杂性和高成本, 秸秆成型燃料的发展一直较为缓慢。近些年, 有研究学者提出利用厌氧发酵方式改性秸秆, 获得的秸秆沼渣成型特性更优。杨世关等[3]研究表明, 玉米秸秆经厌氧发酵后木质素含量有所增大, 这不仅使秸秆沼渣热值有所提高, 同时也更利于压块成型。国外研究学者也提出^[4]

, 沼渣燃料燃烧后, 灰渣中含有大量的P、K、Ca等无机元素, 可将其制作成高营养含量的颗粒肥料。此外, 还有研究发现^[5]

, 沼渣燃烧后, 重金属元素主要分布在粗、气旋和过滤灰当中, 从而可对重金属元素起到分离作用, 特别是Cd、Pd、Zn和Hg等重金属元素已被发现是高挥发性的, 再冷凝后主要停留在过滤灰中。

综上所述, 因生物质成型过程中机械化程度较高, 如将秸秆沼渣用于生产固体燃料, 可实现秸秆气固燃料联产和秸秆沼渣高效处理的双重目的。然而, 目前国内关于秸秆沼渣用于生产固体燃料的研究还较少。秸秆沼渣从产出后, 需经过脱水、干燥及成型等多个环节, 其可行性和经济性还缺乏论证。鉴于此, 本研究选择玉米与水稻两类代表性秸秆为研究对象, 通过沼气发酵、沼渣挤压脱水、沼渣成型、热值测定及能量转化效率等过程的研究分析, 试探索秸秆气固燃料二元联产的关键问题及其可行性和经济性。旨在推动沼气发酵与生物质成型两类秸秆能源化方式的有机结合。

1材料与方法

1.1材料

玉米秸秆与水稻秸秆均收自华中农业大学校内试验田, 秸秆经晾晒后, 切碎至3cm以下。其中, 玉米秸秆的茎部需纵向劈裂成4~8份。厌氧发酵接种物取自实验室厌氧发酵中式装置 (有效容积400L; 发酵底物为猪粪; 运行温度 (35 ± 1) ; pH值 7.58 ± 0.15 ; 悬浮物固体浓度 (47.5 ± 1.71) g/L。

1.2沼气产量测试

沼气产量测试采用瑞典AMPTS-II全自动甲烷潜力测试系统, 每个反应器容积为500mL。为了考察某种物料的最大产气潜力, 一般采用湿法批式厌氧发酵方式进行测试, 发酵周期为15~30d。测试前, 每个反应器中装入400mL接种物和10g秸秆, 混合后反应器内物料的干物质浓度在7%~8%之间, 接种物与秸秆的比例约为2:1(以干物质计)。发酵温度设定为 (35 ± 1) 。

1.3 沼渣产量测算

将秸秆发酵后的剩余物进行固液分离, 然后再用清水将秸秆发酵残渣洗净(洗去秸秆表面附着的污泥)。洗净后的秸秆经风干和烘干后, 测其干重。沼渣产率 $r(\%)$ 可由式(1)计算得出:

$$r = \frac{m_2}{m_1} \times 100\% \quad (1)$$

式中, m_1 ——秸秆发酵前质量(以干物质计, 下同), kg;
 m_2 ——秸秆发酵后沼渣质量, kg。

1.4 秸秆能量利用效率计算

秸秆经生物发酵制气和沼渣制备固体燃料后, 其气固燃料联产的总热量得率 $Q(\text{MJ/kg})$ 可由式(2)~式(4)计算得出:

$$Q = Q_1 + Q_2 \quad (2)$$

$$Q_1 = q_{\text{gas}} \times V_{\text{gas}} \quad (3)$$

$$Q_2 = q_{\text{solid}} \times r \quad (4)$$

式中, Q_1 ——秸秆产沼气的热量得率, MJ/kg; Q_2 ——秸秆产沼渣的热量得率, MJ/kg; q_{gas} ——沼气的热值, MJ/m³; V_{gas} ——秸秆产沼气率, m³/kg; q_{solid} ——秸秆沼渣高位热值, MJ/kg; r ——秸秆沼渣产率。

1.5 分析方法

干物质含量(DM)采用电热鼓风干燥箱、箱式电阻炉, 并根据标准方法测定^[6]

; pH值采用实验室用数显酸度计PHS-3C测定; 纤维素、半纤维素和木质素含量采用美国ANKOM200纤维素分析仪按照范氏法(Van

Soest)测定切; 生物质

固定碳、灰分和挥发分的含量根据GB/T212

—2008中缓慢灰化法进行测定^[7]

; 沼渣热值分析采用HYHW-8A弹热式量热仪(河南, 鹤壁)测定; 生物质成型采用试验型成型机进行, 条件为6MPa, 100成型燃料的机械耐久性测试, 包括抗铁碎性测试和抗渗水性测试, 其测试方法参照文献[8]。

2 结果与分析

2.1 秸秆发酵特性

本研究采用批式厌氧发酵方式分别对玉米秸秆和水稻秸秆的产气潜力进行测试，发酵试验共计进行30d，秸秆的沼

³/kg和0.350m³

/kg，沼渣产率分别为53%和48%。发酵前后，玉米和水稻秸秆的理化参数和工业分析参数均发生一定变化。发酵后秸秆中纤维素与木质素的含量均有所升高，这是由于二者在厌氧发酵过程中难以被降解而易降解物质被大量去除而导致的；由于木质素的热值远高于碳水化合物，因此秸秆沼渣的热值均有所提升，玉米与水稻秸秆沼渣的热值分别提升了6.5%和5.1%，固定碳含量升高也表明单位质量沼渣的放热量更大。沼渣灰分含量较原秸秆有所上升，这在燃烧过程中可能更易出现结渣现象。此外，研究表明，生物质中木质素含量越高，成型特性越好^[9]，因此沼渣中木质素含量升高也有利于其成型压块。

表1 秸秆沼气沼渣产量与发酵前后成分特征

Table 1 Biogas and digestate yield and composition characteristics of straw before and after fermentation

物料	沼气产率/ m ³ ·kg ⁻¹	沼渣产率/ %	半纤维素/ %	纤维素/ %	木质素/ %	灰分/ %	挥发分/ %	固定碳/ %	高位热值/ MJ·kg ⁻¹
玉米秸秆	0.324	—	25.7	33.4	10.3	3.8	77.5	16.8	18.7
玉米秸秆沼渣	—	53	20.1	40.8	15.9	4.7	74.3	18.1	19.9
水稻秸秆	0.350	—	24.8	39.7	13.5	4.2	80.5	15.3	17.5
水稻秸秆沼渣	—	48	19.5	43.2	17.4	5.9	76.4	17.8	18.4

注：所有数据计算均以干基秸秆计。

2.2 秸秆沼渣成型燃料特性分析

将发酵获得的玉米和水稻秸秆沼渣分别进行压块成型试验，与未发酵的秸秆进行对比。重点考察秸秆沼渣成型燃料松弛密度、热值及机械耐久性等指标的变化情况，其结果如表2所示。

表2 秸秆和沼渣成型燃料特性

Table 2 Characteristics of densified straw and biogas digestate

物料	松弛密度/ g·cm ⁻³	抗跌碎性/ %	抗渗水性/ h
玉米秸秆	0.985	4.52	6.0
玉米秸秆沼渣	1.027	3.95	7.5
水稻秸秆	0.946	4.88	5.5
水稻秸秆沼渣	0.989	4.12	6.5

如表2所示，无论是玉米秸秆还是水稻秸秆，发酵后沼渣

的成型密度均有所升高。这与杨世关等^[3]

的研究结果类似，厌氧发酵能提高秸秆的成型密度，且发酵得越彻底，沼渣的成型密度越高。机械耐久性试验也符合此规律，即沼渣的机械耐久性更优。在抗铁碎性实验中，所有实验组的失重率均小于5%，一般认为，失重率大于10%的成型燃料不易于反复搬运及长途运输^[8]

。秸秆沼渣成型后的失重

率更小，这主要由于其成型密度更大和木质素含量

较高。研究表明^[9]

，木质素在高温高压状态下会改变其自身的分子排列结构，从而达到使生物质重新塑形的目的，因此木质素含量越高越有利于生物质成型。在抗渗水性测试中，所有实验组的成型燃料完全分解所需时间均在5h以上，且秸秆沼渣的抗渗水性优于秸秆直接压块。以上实验结果表明，秸秆经厌氧发酵后，秸秆沼渣成型燃料的物理特性更优。

2.3 秸秆气固燃料二元联产能量利用效率

将表1中秸秆产气率、秸秆沼渣产率和固体燃料热值等数据代入式（2）~式（4），可得1kg干基秸秆直燃和气固燃料二元联产所释放的总热量和发电量。如表3所示，如果直接对比发热量，1kg干基玉米和水稻秸秆的直燃发热量均高于气固燃料二元联产的总发热量，但如果换算成发电量，秸秆气固燃料联产则更具优势。1kg干基玉米秸秆气固燃料联产的总发电量为1.11kWh，比直燃发电高约42%；而水稻秸秆气固燃料联产发电为1.09kWh，比直燃发电高约50%。这是由于燃气发电机组的转化效率远高于“锅炉+汽轮机组”模式的热电转化效率，因此在秸秆气固燃料联产过程中，产气越多其整体发电量也越高。

表3 每 kg 干基秸秆的能量利用效率

Table 3 Energy utilization efficiency of straw per kilogram

利用方式		热量/ MJ	发电 系数	发电量/ kWh
直燃发电	玉米秸	18.60	0.15	0.78
	水稻秸	17.40	0.15	0.73
气固联产 (玉米秸秆)	沼气	6.38	0.38	0.67
	沼渣	10.56	0.15	0.44
	合计	16.94	—	1.11
气固联产 (水稻秸秆)	沼气	7.00	0.38	0.74
	沼渣	8.48	0.15	0.35
	合计	15.48	—	1.09

注：沼气热值均以 20 MJ/m^3 计；不同型号或规模的燃气机、锅炉和蒸汽轮机的热效率有所不同，固发电系数在实际上产中会有所波动。

2.4 秸秆气固燃料二元联产的经济性分析

在过去十几年中，单纯的秸秆沼气或秸秆成型燃料的能源化利用已被大量推广应用。秸秆沼渣压块与秸秆直接压块的最大不同是，前者的含水率较高，需干燥处理，这是秸秆气固燃料联产与传统能源化方式的主要差异环节。因此，在经济性分析中，重点讨论秸秆沼渣压块前的干燥成本。

秸秆沼渣的含水率一般约为90%，需经固液分离、风干和机械干燥3个主要环节。以日消耗10t秸秆的能源站为例，每天产秸秆沼渣约为50t（含水率约为90%），经螺旋挤压式固液分离机处理后可得沼渣12.5t（含水率 $\leq 60\%$ ）。因生物质压缩成型前含水率一般要求保持在20%以下，挤压脱水的沼渣仍需进一步干燥处理，则每天产12.5t脱水秸秆沼渣的干燥过程（初始含水率按60%计，终含水率按20%计）需去除水量 y 可由式（5）计算得出，据文献报道，每去除生物质中1kg水所需的热量约为3349.6KJ^[10]，则干燥12.5t脱水沼渣（含6.25t待去除水）所消耗的总热量约为 $2.1 \times 10^4 \text{ MJ}$ 。

$$y = 12.5 \times \frac{60\% - 20\%}{1 - 20\%} = 6.25 \quad (5)$$

对秸秆沼渣烘干热源的选取上一般有2种方案：1）利用沼气发电烟气余热回收对沼渣进行烘干；2）采用生物质或沼气热风炉作为烘干的热量来源^[10]

。每日消耗10t秸秆，平均约可产沼气3000m³，按沼气热值20MJ/m³和35%尾气可回收热量占比计，可从燃气机组尾气回收2.1×10⁴MJ/d的热量，刚好可满足机械烘干能量需求。

如沼气不用于发电，干燥沼渣的热源可选择工程自产生物质成型燃料或沼气。此外，挤压脱水后的沼渣自由水含量高，且比表面积较大（已呈蓬松状态），此时纤维中的水分向环境解析速度也较快（气固界面湿差大）。

因此，实际生产中，在机械烘干前可对高湿度沼渣先进行自然风干或晾晒处理，节约干燥能耗。表4为脱水沼渣经自然风干或晾晒后含水率降至50%和40%，再进行机械烘干所需的热量及消耗生物质或沼气燃料量。

表4 不同风干状态沼渣机械干燥燃料消耗

Table 4 Fuel consumption of mechanical drying of biogas digestate with different air drying conditions

沼渣状态(含水率)	沼渣量 ^a /t·d ⁻¹	机械干燥所需热量/MJ·d ⁻¹	消耗成型燃料 ^b /kg·d ⁻¹	消耗沼气 ^c /m ³ ·d ⁻¹
初始(≥85%)	35.00~50.00	—	—	—
挤压脱水后(≤60%)	12.50	2.1×10 ⁴	1544	1166
风干后(≤50%)	10.00	1.25×10 ⁴	919	694
风干后(≤40%)	8.33	0.7×10 ⁴	514	388

注：a代表按日产5t干基沼渣计；b代表沼渣热值按17MJ/kg计，生物质热风炉热效率按0.8计；c代表沼气热值按20MJ/m³计，燃气热风炉热效率按0.9计。

由表4可知，如在烘干前将沼渣自然风干至含水50%和40%，则所需机械干燥的热量可分别减少40.48%和66.67%，即烘干前物料的初始含水率每下降10%，机械干燥的能量需求减少约40%。无论是采用生物质还是沼气作为热源，其消耗量都会随干燥前初始含水率的降低而大幅减少，且完全可由工程本身产出的气固燃料供给。以风干到含水率50%为例，所需消耗生物质成型燃料或沼气的量分别为919kg/d和694m³

/d（表4），分别约占到工程自身所产各自总量的1/5。因此，在实际生产中，可根据项目所在地的气候和场地等条件，对挤压脱水后的秸秆沼渣进行适当自然风干，可大幅降低后续机械干燥的成本。

2.5 秸秆直接压块和秸秆沼渣压块的经济效益

秸秆直接压块，其成本因素一般包含收集、运输、粉碎、干燥、压块电耗以及人工费用等。与之不同的是沼渣压块是在秸秆沼气工程的下游，可在沼气工程所在地建立压块车间，因此可免除前期收集、运输和粉碎等前处理工序。由于以上构成秸秆压块成本的主要因素大多为可变成本，因此测算依据主要参考文献报道[11,12]和实际调研成本的平均水平。秸秆直接压块与沼渣压块的主要成本构成如表5所示。秸秆直接压块成本约合280¥/t，其中秸秆收运及粉碎成本约占68%，而秸秆沼渣压块成本仅150¥/t，其中沼渣干燥费用约占40%。综合分析，沼渣压块较秸秆直接压块可节省46.4%的成本，节省的成本主要来自于秸秆前期的收运及粉碎过程（计入沼气生产工段）；按生物质成型燃料400¥/t的市场价格计，秸秆沼渣压块的净利润比秸秆直接压块高1倍以上，优势显著。

表5 秸秆压块与沼渣压块的成本对比

Table 5 Cost comparison between straw briquetting and biogas digestate briquetting

名目	直接压块 成本/¥·t ⁻¹	沼渣压块 成本/¥·t ⁻¹
收集	150	—
运输	20	—
粉碎加工	20	—
压块机耗电	40	40
人工	20	20
管理、设备折旧	30	30
干燥*	—	60
总计	280	150
售价	400	400
净利润	120	250

注:*代表按表4中风干至50%含水量的沼渣干燥成本测算,生产1t沼渣成型燃料(含水<20%),约需干燥1.6t含水50%的沼渣,需耗生物质燃料约为150kg(生物质燃料成本按市场价400¥/t计)。

以上成本分析是假定玉米秸秆收获后,其初始含水率在20%以下的情况。实际上,在收获季节,玉米秸秆的初始含水量大多在30%~50%之间,同样在压块或燃烧

前需进行机械干燥处理^[13,14]

。因此,如果与高湿秸秆原料对比,由于沼气发酵无需提前干燥秸秆,故而沼渣压块的成本优势更为明显。此外,因秸秆收获期较为集中,收储量较大,短时间内很难干燥大量秸秆,但直接储存易产生霉变,使秸秆热值下降,进而不

利于秸秆直燃发电和生产成型燃料。而秸秆轻微霉变，某些真菌类微生物产生的纤维分解酶反而会改善秸秆纤维的生物利用效率。因此，如采用秸秆气固燃料二元联产的模式，秸秆收获后可不经过干燥直接储存，而秸秆发霉部分可经厌氧发酵过程去除，不会影响秸秆沼渣的热值和成型后的品质。

3结论

1)厌氧发酵后，玉米和水稻秸秆沼渣热值均有所升高，这是由于沼渣中木质素和固定碳含量上升所致。

2)同等条件下，秸秆沼渣成型后的密度高于原秸秆；且在机械耐久性测试中，秸秆沼渣成型燃料的抗跌碎性与抗渗水性均优于秸秆直接成型。

3)秸秆气固燃料二元联产综合能源利用效率提高40%~50%(以发电量计)。此外，因免除收集、运输和粉碎成本，秸秆沼渣生产成型燃料的综合成本较直接压块可节省46.4%；其销售净利润约为秸秆直接压块的2倍。

综上所述，秸秆气固二元燃料联产模式是秸秆沼气和秸秆成型燃料2种成熟模式的有机结合，不仅可解决独立沼气工程沼渣出路问题，还可转移秸秆成型燃料目前面临的收储运及前处理问题。此外，气固燃料二元联产模式终端产出两类燃料，较单一模式应用更为灵活。沼渣干燥过程是两者结合的关键环节，且受季节和地域因素影响较大，其干燥方式、设备和热源选择等，需要进一步探索和不断优化。

[参考文献]

- [1] KABIR M M, FORGÁCS G, Horváth I S. Biogas from lignocellulosic materials lignocellulose-based bioproducts [M]. Germany, Springer International Publishing, 2015: 207-251.
- [2] 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.
- [3] 杨世关, 肖婷, 李继红, 等. 秸秆厌氧发酵改性制备成型燃料试验[J]. 农业工程学报, 2013, 29(17): 182-187.
YANG S G, XIAO T, LI J H, et al. Densified biomass fuels production from crop straw pretreated by anaerobic fermentation [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2013, 29(9): 182-187.
- [4] KRATZEISEN M, STARCEVIC N, MARTINOV M, et al. Applicability of biogas digestate as solid fuel [J]. Fuel, 2010, 89(9): 2544-2548.
- [5] HÄRDTLEIN M, ELTROP L, THRÄN D. Voraussetzungen zur standardisierung biogener festbrennstoffe [M]. Münster: Landwirtschaftsverlag; 2004.
- [6] 国家环境保护总局. 水和废水监测分析方法编委会. 水和废水监测分析方法[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 2002.
- [7] VAN SOEST P J, ROBERTSON J B, Lewis B A. Methods for dietary fiber, neutral detergent fiber, and nonstarch polysaccharides in relation to animal nutrition[J]. Journal of dairy science, 1991, 74(10): 3583-3597.

- [8] 赵青玲, 张培远, 刘俊红, 等. 原料含水率及成型直径对秸秆成型燃料耐久性的影响[J]. 环境污染与防治, 2006, 28(12): 911-913.
- ZHAO Q L, ZHANG P Y, LIU J H, et al. Effects of raw material water content and briquette diameter on durability of straw densification briquetting fuel [J]. Environmental pollution and control, 2006, 28 (12): 911-913.
- [9] 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.
- [10] 柏杨, 王东向. 利用锅炉余热烘干生物质燃料[C]//江苏电机工程青年科技论坛暨江苏省电机工程学会2011年学术年会, 南京, 2011.
- BAI Y, WANG D X. Using waste heat of boiler to dry biomass fuel [C]//Annual Academic Conference of Jiangsu Electrical Engineering Youth Science and technology Forum, Nanjing, 2011.
- [11] 张佩. 秸秆固化成型机使用经济效益分析[J]. 农业装备技术, 2009, 35(4): 24.
- ZHANG P. The analysis of economic efficiency of the consolidated machines for dealing with grain straws [J]. Agricultural equipment & technology, 2009, 35(4): 24.
- [12] 李果, 王革华. 生物质成型燃料产业化经济与政策分析[J]. 农业工程学报, 2006, (增刊1): 150-153.
- LI G, WANG G H. Economical and policy analysis in the industrialization of biomass briquette fuel [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2006, (sup1): 150-153.
- [13] 雷廷宙, 沈胜强, 吴创之, 等. 玉米秸秆干燥特性的试验研究[J]. 太阳能学报, 2005, 26(2): 224-227.
- [13] LEI T Z, SHEN S Q, WU C Z, et al. Experimental research on drying characteristics of maize straw [J]. Acta energiae solaris sinica, 2005, 26(2): 224-227.
- [14] 丛宏斌, 赵立欣, 孟海波, 等. 农作物秸秆多级协同干燥系统设计及试验[J]. 太阳能学报, 2018, 39(1): 163-169.
- CONG H B, ZHAO L X, MENG H B, et al. Design and test of multilevel collaborative drying system for crop straws [J]. Acta energiae solaris sinica, 2018, 39 (1): 163-169.

原文地址：<http://www.china-nengyuan.com/tech/166462.html>