

湿污泥/秸秆水蒸气共气化制氢及其 碳减排评估研究

黄明^{1,2,3}, 戴泽军^{1,2,3}, 毛文煜^{1,2,3}, 刘良才^{1,2,3}, 杨弘熙^{1,2,3}, 陈丽舟^{1,2,3}, 张紫璇⁴, 胡智泉^{4*}
(1.湖北中烟工业责任有限公司,湖北武汉430040; 2.湖北新业烟草薄片开发有限公司,
湖北武汉430056; 3.重组烟叶应用技术湖北省重点实验室,湖北武汉430040;
4.华中科技大学环境科学与工程学院,湖北武汉430074)

摘要:以高湿污泥和玉米秸秆为原料,利用热重分析仪分析了2种物质掺混后的热解特性,并在固定床反应器中研究了污泥/秸秆共气化特性,考察了污泥与玉米秸秆不同掺混质量比下合成气的变化情况。结果表明,污泥和秸秆掺混物比污泥表现出更优的热解特性。当污泥和秸秆掺混质量比为4:6时,制氢效果最佳,H₂和CO的气体体积分数分别为49.56%和27.42%,H₂的产量为0.61 L/g。在此条件下,综合比较了共气化和污泥/秸秆其他处置方式所产生的碳排放量,共气化可实现负碳排放,碳减排量为1 812.17 kg CO₂/(t 原料),表明污泥与秸秆共气化的碳减排潜力巨大,对环境的负面影响小,是一项可同时实现污泥/玉米秸秆资源化利用、高效气化制氢和节能减排等多重目标的制氢技术。

关键词:碳减排;湿污泥;秸秆;共气化;制氢

中图分类号:TK91

文献标志码:A

文章编号:0253-4320(2024)11-0153-06

DOI:10.16606/j.cnki.issn0253-4320.2024.11.028

Steam co-gasification of wet sludge-stover to produce hydrogen and evaluation on its carbon dioxide emission reduction

HUANG Ming^{1,2,3}, DAI Ze-jun^{1,2,3}, MAO Wen-yu^{1,2,3}, LIU Liang-cai^{1,2,3},
YANG Hong-xi^{1,2,3}, CHEN Li-zhou^{1,2,3}, ZHANG Zi-xuan⁴, HU Zhi-quan^{4*}

(1.China Tobacco Hubei Industrial Co., Ltd., Wuhan 430040, China; 2.Hubei Xinye Reconstituted Tobacco Development Co., Ltd., Wuhan 430056, China; 3.Hubei Provincial Key Laboratory of Recombinant Tobacco Application Technology, Wuhan 430040, China; 4.School of Environmental Science & Engineering, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China)

Abstract: Thermogravimetric analysis is employed to analyze the pyrolysis characteristics of the mixed materials between high-moisture sludge and corn straw. Additionally, the co-gasification characteristics of sludge/straw are studied in a fixed-bed reactor, with a focus on the changes in syngas production under different mass ratios of sludge to corn straw. It is shown that the mixture of sludge and straw exhibits better pyrolysis characteristics compared to sludge alone. When the mass ratio of sludge to straw is 4:6, hydrogen production reaches the optimal, with H₂ and CO gas volume fractions of 49.56% and 27.42%, respectively, and an H₂ yield of 0.61 L·g⁻¹. Under these conditions, a comprehensive comparison is conducted on carbon dioxide emission from co-gasification and other sludge/straw disposal methods. It is verified that the co-gasification process achieves negative carbon dioxide emission, with a carbon dioxide emission reduction of 1 812.17 kg CO₂ per ton of raw materials, indicating that the co-gasification of sludge and straw has significant potential in reducing carbon dioxide emission, and the minimal environmental impact. This technology enables the simultaneous realization of sludge/corn straw utilization, efficient hydrogen production through gasification, energy conservation and emission reduction.

Key words: carbon dioxide emission reduction; wet sludge; stover; co-gasification; hydrogen production

近年来随着城市人口的不断增长,城市污水处理厂数量增加,污泥排放量也随之增大,污泥不仅含水量高,而且成分复杂^[1-2]。复杂的组成造成了污泥的材料转化利用率低、材料提纯困难,而污泥热转化技术能很好地解决这些问题。但由于污泥自身理化特性,如高水分、碳含量偏低、高灰分等,造成污泥热转

化产品品质不高,在热转化过程中,污泥水分蒸发消耗大量能量,而蒸发的水分难以转化为经济价值,因此高含水量是阻碍污泥能源利用的核心矛盾。将有机污泥中的水分也作为一种资源和污泥碳氢资源协同利用,是污泥能源利用领域需要解决的关键科学问题。

收稿日期:2024-02-04;修回日期:2024-09-06

基金项目:国家自然科学基金项目(21975089,22378154);中央高校基本科研基金资助项目(2017KFKJFP002)

作者简介:黄明(1986-),男,硕士,工程师,研究方向为再造烟叶新工艺和新材料,huang_ming@hbtobacco.cn;胡智泉(1971-),男,博士,教授,研究方向为生态能源与碳减排,通讯联系人,huzq@hust.edu.cn。

我国秸秆资源丰富,田间秸秆焚烧导致的大气污染已成为公众关注的热点问题。为弥补二者不足,国内外学者将生物质与污泥掺杂混合进行共气化,2种不同材料混合共气化由于能量转换效率高、运行稳定、环境友好和经济效益较好,是更有效的资源化方案^[3]。湿污泥与秸秆共气化既能同时处理2种废弃物,又能将其转化为高品质的能源,对于实现“碳中和、碳达峰”有着良好的促进作用。目前国内外针对共气化的碳排放评价较少,很难直观感受到共气化技术的碳减排潜力,因此需计算污泥/秸秆共气化过程中所产生的碳排放量,并与污泥/秸秆其他方式产生的碳排放进行对比,在探究气化制氢技术效率最大化的同时,也要关注制氢过程中碳减排潜力。

基于此,笔者针对湿污泥含水率高、碳含量低的特点,以秸秆粉末作为污泥碳源调理剂和黏稠污泥的分散剂,利用其低含水率、高挥发分的优点,进行污泥/秸秆共蒸气气化制氢研究。同时研究不同掺混质量比条件下二者共气化的反应规律。在制氢效率最大化的基础上,利用排放因子法对比共气化制氢技术与其他污泥处置方式的碳排放量,探究湿污泥/玉米秸秆共气化制氢技术对环境的影响。

1 实验部分

1.1 材料

脱水污泥(80%含水率)取自汤逊湖污水处理厂的板框压滤污泥;玉米秸秆,湖北某农产品加工厂生产。

1.2 热重分析实验方法

按污泥(80%含水率)与玉米秸秆不同掺混比例(0%、20%、40%、60%、80%和100%)称取总质量为2g的样品进行热解实验,放入锥形瓶中,瓶口盖上保鲜膜,用橡皮筋固定。将封装好的锥形瓶放入摇床,设置温度为24℃,转速为200 r/min,定时24 h。将制备后的掺混样装入样品管中备用。实验条件设置为: N_2 气氛, N_2 流量为100 mL/min,升温速率为5、10、20℃/min,终温为950℃。

1.3 共气化实验流程及制氢影响参数设置

1.3.1 共气化实验流程

污泥/秸秆共气化固定床反应器示意图如图1所示。将1g湿污泥/玉米秸秆置于固定床反应器中,以500 mL/min流速通入 N_2 以带出反应器内残余气体,为充分反应, N_2 流速降至120 mL/min。设置电炉的升温速率为20℃/min,达到指定温度,通

入去离子水保证炉膛充满水蒸气,利用在线烟气分析仪测定气体组分。为保证实验的准确性,实验重复3次,取平均值。

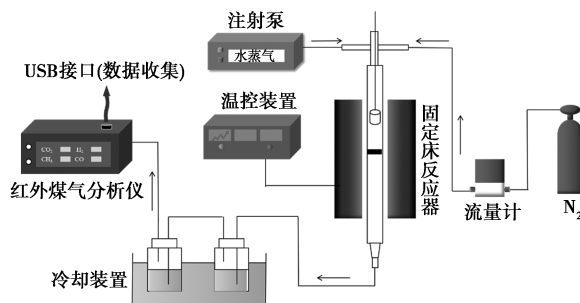


图1 污泥/秸秆共气化固定床反应器示意图

为探究湿污泥/玉米秸秆水蒸气共气化产氢性能,以氢气组分含量、产氢率和总产气量为评价指标,合成气各组分体积分数和低位热值等指标的计算式如下:

共气化合成气(以 H_2 、 CO 、 CO_2 和 CH_4 为主)总体积 V_{gas} (L):

$$V_{N_2} = v_{N_2} \times t_{N_2} \quad (1)$$

$$V_{gas} = V_{N_2} / (1 - X_{CO} - X_{CO_2} - X_{CH_4} - X_{H_2}) \quad (2)$$

式中: V_{N_2} 为气化反应过程进入反应系统的 N_2 总体积; v_{N_2} 为通入 N_2 的速率; t_{N_2} 为通入 N_2 的时间; V_{gas} 为气体产物总体积; X_i ($i=H_2$ 、 CO 、 CO_2 、 CH_4)为各气体占合成气总体积的体积分数, %。

共气化合成气各组分体积(L):

$$V_i = V_{gas} \times X_i \quad (3)$$

式中, V_i ($i=H_2$ 、 CO 、 CO_2 、 CH_4)为合成气各组分体积,L。

共气化合成气中各组分在合成气中的体积分数(%):

$$\varphi_i = V_i / (V_{H_2} + V_{CO} + V_{CO_2} + V_{CH_4}) \quad (4)$$

式中: φ_i ($i=H_2$ 、 CO 、 CO_2 、 CH_4)为各单组分气体组分的相对体积分数, %。

共气化总产气量:

$$G_y = [V_{gas} \times (100 - X_{N_2})] / 100 \quad (5)$$

式中: G_y 为总产气量,即标准状态下每单位原料气化所产生气体产物的体积, Nm^3/g 。

共气化产氢率:

$$Y_{H_2} = (V_{gas} \times \varphi_{H_2}) / 100 \quad (6)$$

式中: Y_{H_2} 为每克原料气化产氢率,L/g。

合成气体热值:

$$LHV = (108.2 \overline{X_{H_2}} + 126.4 \overline{X_{CO}} + 358.8 \overline{X_{CH_4}} + 600.9 \overline{X_{C_2H_m}}) / 1000 \quad (7)$$

式中: LHV 为合成气体低位热值, MJ/Nm^3 ; \bar{X}_i ($i=H_2$ 、 CO 、 CH_4 、 C_2H_m)为各单组分气体组分的相对体积分数,%。

1.3.2 共气化制氢影响参数设置

探究掺混比对原料水蒸气共气化制氢的影响。实验原料取1g,气化时间为30min,温度为 $900^\circ C$,水蒸气流速为2 mL/min。污泥与秸秆掺混质量比设置为0:1、2:8、4:6、6:4、8:2、1:0。

1.4 碳排放及碳减排潜力计算

1.4.1 温室气体核算边界

为评估污泥/秸秆共气化技术和其他典型处置方式的碳排放效应,需要确定温室气体核算边界。温室气体排放分为直接排放和间接排放^[4],直接排放是指污泥在处理过程中产生的 CO_2 、 CH_4 、 N_2O 等气体,而间接排放是指污泥在处理过程中电耗及药耗等引起的碳排放。在湿污泥/玉米秸秆水蒸气共气化制氢实验过程中,温室气体核算边界包括气化系统的电能消耗和共气化产生的 CO_2 所造成的碳排放及由稳定碳封存和产氢引起的碳减排。

$$CO_{2总} = CO_{2电} + CO_{2合成气} - CO_{2碳减排-稳定碳} - CO_{2碳减排-氢能} \quad (8)$$

1.4.2 温室气体排放核算公式

选择《IPCC 2006年国家温室气体清单指南2019修订版》提出的排放因子法进行核算。排放因子法是根据目标排放源的活动水平数据(AD)与参考的温室气体排放清单中对应的排放因子(EF)相乘,将乘积结果作为目标排放源的碳排放量估值。其计算式如下:

(1) 固定床气化系统的电能消耗

电能消耗所对应的电力生产 CO_2 排放量($CO_{2电}$)可通过系统运行的活动水平数据($AD_{电}$)与对应排放因子($EF_{电}$)相乘获得:

$$CO_{2电} = AD_{电} \times EF_{电} \quad (9)$$

式中: $CO_{2电}$ 为电能消耗的碳排放量, $g CO_2/轮$; $AD_{电}$ 是系统运行时所用电量总和; $EF_{电}$ ($t CO_2/MWh$) = 0.5810(数据来源:环办气候函[2022]111号《关于做好2022年企业温室气体排放报告管理相关重点工作的通知》)。

(2) 合成气中的 CO_2 温室气体排放:

$$Y_{CO_2} = (V_{gas} \times \varphi_{CO_2})/100 \quad (10)$$

$$CO_{2合成气} = Y_{CO_2} \times \rho_{CO_2} \times m_{原料} \quad (11)$$

式中: $CO_{2合成气}$ 为合成气的碳排放量, $g CO_2/轮$; Y_{CO_2} 为每克原料气化二氧化碳产率, L/g ; ρ_{CO_2} 为 CO_2 的气态密度为 $1.997 g/L$; $m_{原料}$ 为参与气化物料的

质量。

(3) 稳定碳封存

污泥或玉米秸秆中有机质通过热解气化转化为稳定碳封存于焦炭中。该部分碳减排量计算式为:

$$CO_{2碳减排-稳定碳} = C_{原料} \times \delta_{稳定碳} \times (44/12) \quad (12)$$

式中: $CO_{2碳减排-稳定碳}$ 为稳定碳的碳减排量, $g CO_2/轮$; $C_{原料}$ 为原料中碳元素的含量; $\delta_{稳定碳}$ 为稳定碳含量系数,取0.25^[5]。

(4) 产生的氢能

氢能作为可再生、无污染、利用率最高的最干净能源,可作为煤的替代能源,降低能源使用中的二氧化碳排放。产氢的碳减排量为:

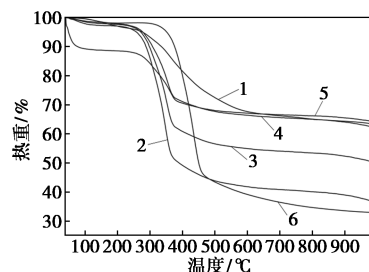
$$CO_{2碳减排-氢能} = Y_{H_2} \times \rho_{H_2} \times \sigma_{氢能} \times m_{原料} \quad (13)$$

式中: $CO_{2碳减排-氢能}$ 为产氢的碳减排量, $g CO_2/轮$; Y_{H_2} 为每克原料气化产氢率, L/g ; ρ_{H_2} 为 H_2 的密度,为 $0.0899 g/L$; $\sigma_{氢能}$ 为每克氢气替代煤炭能减少的 CO_2 量,取 $34.92 g$ ^[6]; $m_{原料}$ 为参与气化物料的质量。

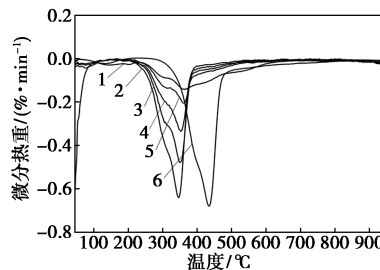
2 结果与讨论

2.1 污泥与玉米秸秆 TG/DTG 分析结果

将不同掺混质量比的湿污泥与玉米秸秆混合并进行热解实验,得到的TG/DTG曲线如图2所示。



(a) TG



(b) DTG

1—0%; 2—20%; 3—40%; 4—60%; 5—80%; 6—100%

图2 不同掺混质量比的湿污泥与玉米秸秆热解的TG/DTG

由图2(a)可知,掺混样的热解过程与单独热解类似,同样存在水分析出阶段、挥发分析出阶段和残余物缓慢分解阶段。不同掺混质量比(0%、20%、

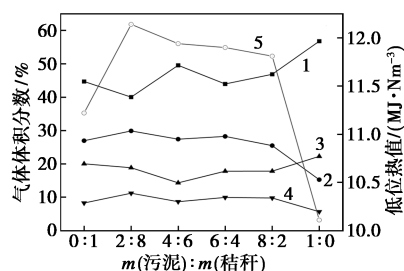
40%、60%、80%和100%) 在第2阶段挥发分析出的热失重分别为28.78%、55.74%、41.82%、31.62%、21.27%、58.75%。由图2(b)可知,掺混样的DTG曲线一直处于2种原料单独热解的DTG曲线之间。不同质量比的掺混样在低温区均出现了肩状峰。高温区受温度影响导致大量挥发分析出,产生了最大失重峰。曲线中较小的失重峰是由原料中无机物质受热分解导致。与污泥、秸秆单独热解相比,掺混样DTG曲线的趋势没有变化,但与之对应的出峰温度区间较低。当玉米秸秆掺混质量比增加到60%时,掺混样的热失重率降低,共热解过程中挥发物释放量减少。表明过多的玉米秸秆掺混后会出现烧结等不利于热分解的现象^[7]。

综上所述,污泥、秸秆掺混样的热解特性总体优于污泥单独热解,但当玉米掺混质量比过高时,其热解过程会受到抑制。因此以研究掺混比的影响为起点开展共气化实验,探究不同污泥秸秆掺混比条件下的污泥/秸秆制氢特性及最佳反应工况。

2.2 污泥/玉米秸秆共气化制氢特性

根据2.1的研究结果,污泥与一定比例的玉米秸秆掺混后大大提升了热解特性,有利于污泥水分参与气化反应。因此,以污泥/玉米秸秆为共气化材料,以合成气各组分含量、产氢率、总产气量和热值为评价指标,探究了湿污泥/玉米秸秆共气化制氢优化工艺条件,考察了原料掺混比对共气化制氢特性的影响。

在气化温度为900℃、水蒸气流速为2 mL/min的条件下,考察不同掺混质量比对共气化制氢的影响,如图3所示。



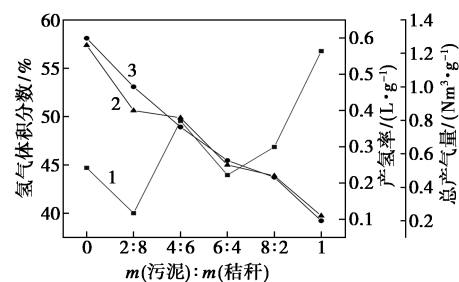
1—H₂ 体积分数;2—CO 体积分数;3—CO₂ 体积分数;
4—CH₄ 体积分数;5—低位热值

图3 掺混质量比对气体组分体积分数、
LHV 的影响

从图3中可以看出,随着湿污泥的质量分数从0%增加到40%,H₂ 体积分数从44.70%逐渐增加到49.56%。纯污泥的氢气体积分数(56.77%)高于纯玉米秸秆(44.70%),污泥添加质量分数为40%时,

产氢率最高,为49.56%。CO 体积分数随着湿污泥质量分数的提高呈现出先增加后减少的趋势,CO₂ 体积分数的变化却正好相反。从玉米秸秆和污泥元素分析发现,污泥的碳元素质量分数为19.70%,玉米秸秆的碳元素质量分数为39.91%。因此,掺混物的碳元素质量分数会随着污泥质量分数的增加而逐渐降低,相反水碳比会逐渐升高。这促进了一氧化碳水蒸气重整反应进行,生成更多的H₂ 和CO₂。当湿污泥质量分数高于60%时,CO 体积分数下降,CO₂ 体积分数上升。其原因在于湿污泥的高含水量导致蒸气过剩,利于通过水气转换反应将CO 转化为CO₂。CH₄ 体积分数随湿污泥占比增加无明显规律,但掺混样品的CH₄ 体积分数高于湿污泥和玉米秸秆单独气化,说明两者共气化生成了更多的CH₄。合成气低位热值的波动范围为10.11~12.14 MJ/Nm³,其热值随着混合比例增加呈现出先增加后减小的趋势,与气体组分中高热值的CO 和CH₄ 变化趋势相一致。

掺混质量比对氢气体积分数、产氢率和总产气量的影响如图4所示。



1—氢气体积分数;2—产氢率;3—总产气量

图4 掺混质量比对氢气体积分数、产氢率和
总产气量的影响

随着污泥掺混质量比的增加,H₂ 体积分数呈现先下降后波动上升的趋势。湿污泥单独气化其H₂ 体积分数最高。产氢率和总产气量则随着污泥掺混质量比的升高呈现出明显的下降趋势,且均低于玉米秸秆单独气化。这是因为湿污泥单独气化时,原料中的水分质量分数最高,有助于发生水蒸气重整反应,获得更加纯净的H₂,但由于可供气化的C—H—O 有机物含量少,导致产氢率和总产气量最低,无法实现大规模的工业应用。而玉米秸秆单独气化时,因自身较高的有机物含量导致产氢率和总产气量最大,但较低的含水率却导致产物中H₂ 体积分数偏低,无法获得高H₂ 体积分数的合成气。这与2.1中污泥和玉米秸秆共热解研究结果相一致。当

掺混质量比为4:6时,合成气中 H_2 体积分数较高,仅次于污泥单独气化,而产氢率、总产气量和LHV等指标也表现良好,仅略低于掺混质量比为2:8时的数据。从氢气体积分数、产氢率、总产气量和LHV综合考虑,该工艺的最佳掺混质量比为4:6,此条件下的 H_2 体积分数、产氢率和总产气量分别为49.56%、0.61 L/g和1.27 Nm³/g。

2.3 污泥/秸秆共气化与其他典型处置方式碳排放核算比较分析

2.3.1 污泥/秸秆共气化产生的碳排放量

污泥/秸秆共气化产生的碳排放量包括电力消耗、合成气 CO_2 排放;带来的碳减排包括稳定碳封存以及气化过程生成的可再生能源氢能。为了模拟实际气化工程应用中的碳排放,电耗参考江西某年处理8 000 t的生物质气化联产项目,其2019年消耗原料8 400 t,用电量为241 920 kWh,处理1 t生物质原料需要用电28.8 kWh^[8];其余数值以2.2中最佳工艺条件下的共气化的实验数据进行计算。依据式(9)~(13),污泥/秸秆共气化产生的碳排放量如表1所示。从表1可知,电能消耗所带来的碳排放量为16.73 kg CO_2 /(t 原料),合成气中 CO_2 产生的碳排放量为379.43 kg CO_2 /(t 原料),稳定碳封存和合成气中的 H_2 所带来的碳减排效益分别为293.33 kg CO_2 /(t 原料)、1 915 kg CO_2 /(t 原料)。污泥/秸秆共气化过程中产生的碳减排量为1 812.17 kg CO_2 /(t 原料)。需要指出的是,上述固定床所得的最优工艺参数在实际工程中可能有所差异。总体而言,湿污泥/秸秆共气化过程表现出优异的碳减排特性,如煤和石油焦作为原料共气化产生的碳减排量仅为792.7 kg CO_2 /(t 原料)^[9]。

表1 污泥/秸秆共气化产生的碳排放量

项目	参数名称	参数数值	碳排放量/ [kg CO_2 ·(t 原料) ⁻¹]
电耗	电能	28.8 kWh/(t 原料)	16.73
合成气中的 CO_2	Y_{CO_2}	0.19 L/(g 原料)	379.43
稳定封存碳	$C_{原料}$	0.32 g/(g 原料)	-293.33
合成气中的 H_2	Y_{H_2}	0.61 L/g	-1915.00
合计	—	—	-1812.17

2.3.2 污泥/秸秆其他典型处置方式产生的碳排放量

常见的污泥处置方式包括填埋、焚烧和干化等,在处置过程中,污泥有机物的分解和转化会产生

CO_2 气体,会产生碳排放。李知兵等^[10]在25万t污水处理规模基础上,比较了污泥填埋、焚烧和干化这3种常见的污泥处置方式的碳排放因子,如表2所示。从表2可知,填埋、焚烧和干化的碳排放因子分别为5.68、5.26 g CO_2 /g和5.61 g CO_2 /g,其应用占比分别为45%、23%和31%。

表2 各种典型处置方式的碳排放因子^[10-12]

参数类别	参数数值	处置技术应用 占比/%
污泥处置方式碳排放因子		
填埋	5.68 g CO_2 /(g 污泥)	45
焚烧	5.26 g CO_2 /(g 污泥)	23
干化	5.61 g CO_2 /(g 污泥)	31
秸秆处置方式碳排放因子		
肥料化	0.18 g CO_2 /(g 秸秆)	62.1
饲料化	0.05 g CO_2 /(g 秸秆)	15.4
燃烧化	0.62 g CO_2 /(g 秸秆)	8.5
基料化	0.08 g CO_2 /(g 秸秆)	0.7
原料化	0.42 g CO_2 /(g 秸秆)	1.0

在秸秆露天禁烧实施以来,秸秆的处理主要通过其综合利用,主要包括肥料化、饲料化、燃料化、基料化和原料化^[11]。在秸秆综合利用过程中,秸秆从农作物收获后还田、离田收储运、加工转化与利用以及副产物还田会产生碳排放。霍丽丽等^[16]核算了秸秆综合利用过程中的碳排放因子,如表2所示。肥料化、饲料化、燃料化、基料化和原料化的碳排放因子分别为0.18、0.05、0.62、0.08 g CO_2 /(g 秸秆)和0.42 g CO_2 /(g 秸秆),其5种处置方式应用占比分别为62.1%、15.4%、8.5%、0.7%和1.0%。污泥和秸秆的处置方式分别以填埋和肥料化应用最为广泛,而以污泥焚烧和秸秆饲料化产生的碳排放最少。当以污泥和秸秆4:6的质量比进行处置时,在利用相同原料的条件下,污泥填埋和秸秆肥料化碳排放量为2 380 kg CO_2 /(t 原料),而污泥焚烧和秸秆饲料化碳排放量为2 134 kg CO_2 /(t 原料)。

2.3.3 不同污泥处置方式碳排放量分析

综上所述,污泥/秸秆(掺混质量比4:6)共气化产生的碳排放量为-1 812.17 kg CO_2 /(t 原料),而应用最为广泛的污泥填埋和秸秆肥料化方式产生的碳排放量则为2 380 kg CO_2 /(t 原料)。结果表明污泥/秸秆共气化处理方式的碳减排潜力巨大,对环境

负面影响小。研究证明湿污泥/玉米秸秆共气化是一项可同时实现污泥/玉米秸秆资源化利用、高效气体制氢和节能减排等多重目标的制氢技术。

3 结论

(1) 污泥/玉米秸秆掺混样的热解过程与污泥、秸秆单独热解类似,可分为水分析出、挥发分析出和残余物缓慢分解 3 个阶段。不同掺混质量比样品(0%、20%、40%、60%、80%和 100%) 在挥发分析出阶段的热失重率分别为 28.78%、55.74%、41.82%、31.62%、21.27%、58.75%。

(2) 在湿污泥与玉米秸秆掺混质量比为 4:6, 污泥/秸秆共气化制氢效果最佳,产氢率和总产气量分别达到 49.56%、0.61 L/g, 合成气中 H₂ 和 CO 的体积分数分别为 49.56%和 27.42%。

(3) 污泥/秸秆(掺混质量比 4:6) 共气化技术可实现负碳排放,其碳减排量为 1 812.17 kg CO₂/(t 原料),而应用最为广泛的污泥填埋和秸秆肥料化方式产生的碳排放量为 2 380 kg CO₂/(t 原料),表明在消耗相同原料的条件下,污泥/秸秆共气化的碳减排潜力巨大,对环境负面影响小。

参考文献

[1] Dai Quxiu, Ma Liping, Ren Nanqi, *et al.* Research on the variations of organics and heavy metals in municipal sludge with additive

(上接第 152 页)

[7] Montini T, Melchionna M, Monai M, *et al.* Fundamentals and catalytic applications of CeO₂-based materials [J]. *Chemical Reviews*, 2016, 116(10):5987-6041.

[8] Fan, Huan Jung, Wang, *et al.* Landfill leachate treatment with Mn and Ce oxides impregnated GAC-ozone treatment process [J]. *Colloids and Surfaces, A. Physicochemical and Engineering Aspects*, 2015, 482:536-543.

[9] Ansari A A, Adil S F, Alam M, *et al.* Catalytic performance of the Ce-doped LaCoO₃ perovskite nanoparticles [J]. *Scientific Reports*, 2020, 10(1):15012.

[10] Chen Fengtao, Yan Haitao, Wang Junjie. High-efficient catalytic ozonation for degradation of nitrobenzene in water with Ce-doped LaCoO₃ catalyst [J]. *Chemical Routes to Materials*, 2024, 59:3406-3420.

[11] 李岗归, 黄丹阳, 赵小龙, 等. 电化学沉积法制备 ZnO 厚膜工艺研究 [J]. *人工晶体学报*, 2024, 53(6):1069-1077.

[12] Phuoc Hoang Ho, Matteo Ambrosetti, Gianpiero Groppi, *et al.* Electrodeposition of CeO₂ and Pd-CeO₂ on small pore size metallic foams: Selection of deposition parameters [J]. *Catalysis Today*, 2019, 334:37-47.

[13] Lilla Fijlek, Lukasz Wolski. Bifunctional CePO₄/CeO₂ nanocomposite as a promising heterogeneous catalyst for the enhancement of the

acetic acid and modified phosphogypsum [J]. *Water Research*, 2019, 155:42-55.

[2] Sudharsan Varma V, Shubam Nashine, Chivukula V Sastri, *et al.* Kalamdhad. Influence of carbide sludge on microbial diversity and degradation of lignocellulose during in-vessel composting of agricultural waste [J]. *Ecological Engineering*, 2017, 101:155-161.

[3] Hu Mian, Gao Lan, Chen Zhihua. Syngas production by catalytic in-situ steam co-gasification of wet sewage sludge and pine sawdust [J]. *Energy Conversion and Management*, 2016, 111:409-416.

[4] 谢淘, 汪诚文. 污水处理厂温室气体排放评估 [J]. *清华大学学报(自然科学版)*, 2012, 52(4):473-477.

[5] 张齐生, 马中青, 周建斌. 生物质气化技术的再认识 [J]. *南京林业大学学报(自然科学版)*, 2013, 37(1):1-10.

[6] 马涛, 孙佰清, 郭海风, 等. 我国中长期经济发展中氢能消费量及 CO₂ 减排效果估算 [J]. *太阳能学报*, 2010, 31(11):1521-1526.

[7] 谭洪, 王树荣, 骆仲决, 等. 生物质三组分热裂解行为的对比研究 [J]. *燃料化学学报*, 2006, (1):61-65.

[8] 王莹. 基于秸秆自然腐解基准线的秸秆热解气化工程生态价值量估算方法研究 [D]. 北京: 中国农业科学院, 2021.

[9] 刘臻, 次东辉, 方薪晖, 等. 基于含碳废弃物与煤共气化的碳循环概念及碳减排潜力分析 [J]. *洁净煤技术*, 2022, 28(2):130-136.

[10] 李知兵, 李慧莉, 刘煜, 等. 污水处理系统碳排放预测方法 [J]. *四川环境*, 2023, 42(3):340-349.

[11] 霍丽丽, 姚宗路, 赵立欣, 等. 秸秆综合利用减排固碳贡献与潜力研究 [J]. *农业机械学报*, 2022, 53(1):349-359.

[12] 夏杨, 刘晓静, 张云富, 等. 剩余污泥处置技术现状与展望 [J]. *中国资源综合利用*, 2023, 41(3):92-97. ■

ozonation recovery effect in the presence of chloride ions [J]. *Scientific Reports*, 2022, 12:9043.

[14] 张娜, 黄妍, 张俊丰, 等. 负载型 LaCoO₃/MO₂ 催化氧化甲苯与 NO 的性能研究 [J]. *燃料化学学报*, 2022, 50(7):868-876.

[15] 孙伟, 崔丽凤. Ce-Cu 协同作用对 Ce-CB/Al₂O₃ 催化剂催化甲醛乙炔化性能的影响 [J]. *现代化工*, 2024, 44(8):152-157, 162.

[16] Tang Xi, Zhang Yifei, Li Weiqi, *et al.* Mechanism and toxicity evaluation of catalytic ozonation over Cu/Ce-Al₂O₃ system aiming at degradation of humic acid in real wastewater [J]. *Scientific Reports*, 2021, 11:8748.

[17] 李小丽, 李朋喜, 姜越, 等. 镍铁基高效碱性析氧电催化剂的研究进展 [J]. *电镀与精饰*, 2023, 45(6):60-66.

[18] 邱文婕, 胡珍, 周其洪, 等. 稀土氧化铈增强的钴基电催化材料及其性能 [J]. *复合材料学报*, 2024, 41(2):804-815.

[19] 查蕾. BiVO₄/Bi₂S₃/rGO 和 α-Fe₂O₃/ZnFe₂O₄/Co-Pi 光阴极的构建及其光电化学水分解性能研究 [D]. 北京: 北京化工大学, 2024.

[20] 张泽玺. 复合电场耦合微生物协同处理中药提取废水的实验研究 [D]. 兰州: 兰州交通大学, 2022.

[21] Fu Jie, Liu Ning, Mei Lefu, *et al.* Synthesis of Ce-doped Mn₃Gd_{7-x}Ce_x(SiO₄)₆O_{1.5} for the enhanced catalytic ozonation of tetracycline [J]. *Scientific Reports*, 2019, 9:18734. ■