

工业技术

基于生物质的乙酰丙酸-电力联产系统性能分析

范军毅, 陈衡*, 刘战, 高悦, 潘佩媛, 徐刚, 张国强
(华北电力大学, 北京 102206)

摘要:为实现农业固体废弃物的资源化利用、减少碳排放,利用小麦秸秆制取重要平台化合物乙酰丙酸,并提出了利用反应后的木质素等生物质固体残渣以及有机废水厌氧发酵后产生的沼气作为燃料与生物质电厂耦合的系统方案。尽可能减少工艺流程中废物的生成,降低处理成本并发电,从而促进生物质的资源化利用以及农业的可持续发展。利用 Aspen Plus 软件对麦秆制备乙酰丙酸的工艺流程进行设计并模拟,得到质量分数为 99.2% 的产品 LA。计算和分析结果表明,每年生产的乙酰丙酸量为 11 864.2 t,生物质电厂的发电功率为 10.3 MW,净发电效率为 34.3%。在运行周期内,新系统的净现值可达到 3 7961 万元,动态回收周期为 3.57 a。由此可知,新系统是高效且经济可行的。

关键词:固体废弃物;小麦秸秆;乙酰丙酸;流程模拟;资源化利用

中图分类号:TK6

文献标志码:A

文章编号:0253-4320(2025)S1-0360-06

DOI:10.16606/j.cnki.issn0253-4320.2025.S1.065

Analysis on performance of biomass-based levulinic acid-electricity cogeneration system

FAN Jun-yi, CHEN Heng*, LIU Zhan, GAO Yue, PAN Pei-yuan, XU Gang, ZHANG Guo-qiang
(North China Electric Power University, Beijing 102206, China)

Abstract:In order to realize the utilization of agricultural solid wastes as resource and reduce carbon dioxide emission, a systematic scheme is proposed that wheat straw is utilized to produce levulinic acid, an important platform compound. Biomass solid residues after the reaction, such as lignin, as well as biogas generated from anaerobic fermentation of organic wastewater from the reaction are used as fuel to couple with a biomass power plant. This process minimizes the generation of wastes, reduces treatment cost and generates electricity, thus promoting the utilization of biomass as well as the sustainable development of the agriculture. This process flow for the production of levulinic acid from wheat straw is designed and simulated by means of Aspen Plus software to obtain levulinic acid product with a mass fraction of 99.2%. Calculation and simulation show that 11 864.2 tons of levulinic acid can be produced annually, and the biomass power plant generates 10.3 MW of electricity, presenting a net power generation efficiency of 34.3%. During the operation cycle, the NPV of the new system can reach RMB 379.61 million, and the dynamic payback cycle is 3.57 years. It is indicated that the new system is efficient and economically viable.

Key words:solid wastes; wheat straw; levulinic acid; process simulation; utilizing waste as a resource

联合国经济和社会事务部预测,到 2050 年,世界人口将达到 97 亿^[1]。随着人口体量与经济规模的不断扩大,能源需求与日俱增。石油、煤炭等化石能源的无节制开采加速了资源枯竭;大气污染物和温室气体的大量排放对生态环境造成了严重破坏^[2]。为积极应对环境变化问题,我国提出了到 2030 年实现“碳达峰”、2060 年实现“碳中和”的双碳目标。这一目标的提出促进了可再生能源的发展^[3]。木质纤维生物质是一种可再生的碳源,包含各种木林竹材及其加工剩余物,以及农作物采收剩余物(如麦秸、甘蔗渣、稻壳、玉米芯),具有储量丰

富、分布广泛、廉价易得等优点,可以用来生产液体燃料和化学品。其作为原料既可降低生产成本,又可减少二氧化碳排放,已引起广泛关注^[4]。

在以纤维素为底物制备的各种产物中,乙酰丙酸(LA)是一种重要的化学品,是美国能源部确定的 12 种最有价值的平台化合物之一^[5]。乙酰丙酸具有反应性双官能团的性质,是一种含有羰基和羧基的短链脂肪酸,以其为原料生产的化学品具有广泛的市场应用,如生产增塑剂、石油添加剂、芳香剂等。此外,乙酰丙酸是制药、食品香精、聚合物塑料、树脂、纺织、农药化学品、燃料、溶剂和有机合成等行业

收稿日期:2024-05-20;修回日期:2024-11-06

基金项目:国家自然科学基金面上项目(52276006)

作者简介:范军毅(2000-),男,硕士生,研究方向为固废资源化利用;陈衡(1989-),男,博士,副教授,研究方向为多能互补系统集成与优化,通讯联系人,heng@ncepu.edu.cn。

的重要合成前体^[6]。

Kapanji 等^[7]在传统南非制糖厂的基础上,以甘蔗渣为原料制备乙酰丙酸并进行热电联产,提高了制糖厂的经济效益;Wan 等^[8]研究了马来西亚背景下利用棕榈类生物质精炼制备乙酰丙酸的可行性,并进行了技术经济分析,发现劳动力成本和预处理过程对该系统具有显著影响;常春^[9]考查了温度、酸浓度、液固比、原料粒度和反应时间对乙酰丙酸产率的影响,并研发了以离子交换树脂法和真空精馏结合分离提纯乙酰丙酸的新工艺,最终得到纯度为98%的乙酰丙酸;苏家磊^[10]以牛粪为底物制备乙酰丙酸,利用碱处理法对牛粪进行预处理,经预处理后的乙酰丙酸产率明显提高,达到293.8 g/kg,并以KOH为活化剂制备了碳基固体酸催化剂,提出农业废弃物牛粪资源化的新途径。

基于以上研究,本文提出一种利用农业固体废弃物小麦秸秆制取乙酰丙酸,并利用反应后的木质素等生物质固体残渣以及有机废水厌氧发酵后产生的沼气等副产物作为燃料,与生物质电厂进行耦合的方案,并对新系统的能量和经济性关键参数进行分

析,其基本组成如图1所示。该系统旨在尽可能减少工艺流程中废物的生成,降低处理成本并发电,从而促进生物质的资源化利用以及农业的可持续发展。

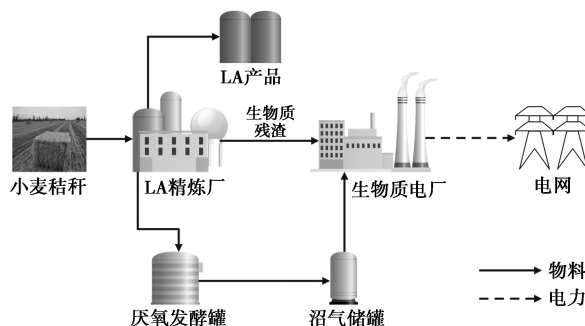


图1 新系统的基本组成

1 系统介绍

基于生物质的乙酰丙酸-电力联产系统流程如图2所示。选用 Aspen Plus 软件进行流程模拟和计算。非随机双液(NRTL)性质方法用于过程模拟,其既适用于混合物,包括极性液体,如甲酸和水,也适用于形成三元汽液平衡的混合物^[11]。

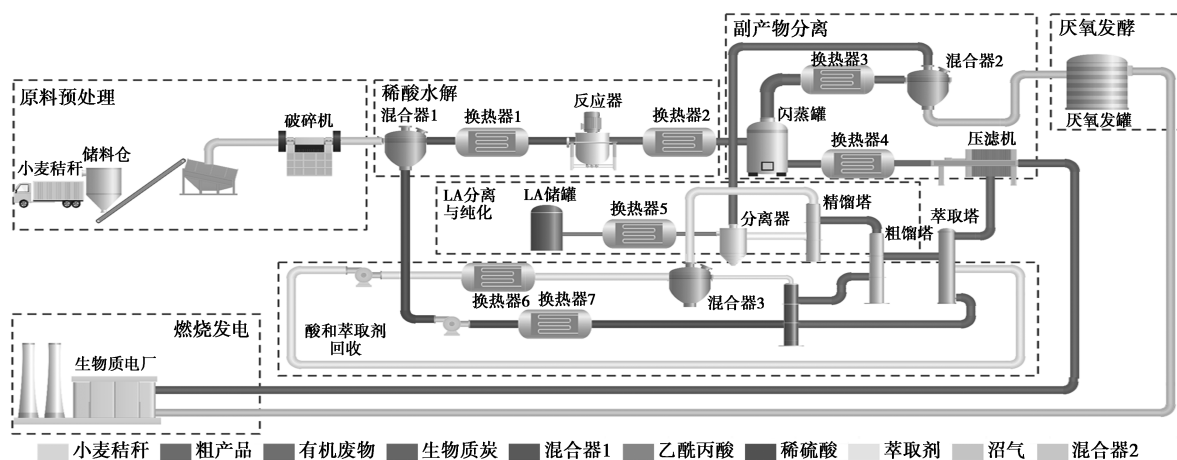


图2 基于生物质的乙酰丙酸-电力联产系统流程图

1.1 麦秆制备乙酰丙酸

麦秆制备乙酰丙酸的流程可划分为原料预处理工段、稀酸水解工段、副产品分离工段、乙酰丙酸分离与纯化工段以及酸和萃取剂回收工段。其中原料预处理工段是将原料进行破碎和研磨,只发生了物理变化,且没有压力的变化。因此本文并未对该工段进行模拟,但经济性分析部分考虑了预处理过程中原料破碎及厂区内传送的费用。其处理过程是将小麦秸秆进行研磨,使原料的尺寸降低到5~10 mm,并去除其中含有的金属、灰尘等杂质,然后由传送带送入反应器中^[11]。

本文构建了年处理8.9万t小麦秸秆生产乙酰丙酸的工艺流程。所选取的麦秆的工业分析和元素分析如表1所示,其成分分析如表2所示^[12]。

表1 本研究中小麦秸秆的元素分析和工业分析 wt%

元素分析	数值	工业分析	数值
C _{ar}	50.9	M _{ar}	8.3
H _{ar}	6.4	V _{ar}	70.2
O _{ar}	42.0	FC _{ar}	15.0
N _{ar}	0.5	A _{ar}	6.5
S _{ar}	0.2		

表 2 本研究中小麦秸秆的成分分析 wt%

原料	纤维素	半纤维素	木质素及其他
麦秆	42.5	31.8	25.7

利用 Aspen Plus 对乙酰丙酸制备系统的工艺流程进行建模,其流程图如图 3 所示。经研磨粉碎后的麦秆在流程图中为流股 FEED,另一进料为稀硫酸(流股 H_2SO_4),其质量分数为 2%。调整硫酸流股的用量以获得固体物含量为 10% 的反应器进料。两流股混合后经换热器(模块 H1)预热进入产率反应器(模块 RYIELD),并在反应器中进行水解,其产率参考 Hayes^[13] 的研究。反应后的产物进入闪蒸罐(模块 FLASH)进行闪蒸,其中副产物糠醛、甲酸和水等组分被闪蒸为气相,经 GAS 物流线流出,其余组分进入换热器 H4 进行冷却,接着在固液分离器(模块 FILTER)进行固液分离,其中未反应的木质素与纤维素、半纤维素等生物质炭经 SOLID 物流线流出,可作为生物质燃料进行燃烧。液相组分经 LIQUID 物流线进入萃取柱(模块 EXTRACT)。由

于甲基异丁基酮(MIBK)、二氯甲烷(DCM)和仲丁醇等有机溶剂已被证明是有效的萃取溶剂^[14],因此本研究选用 MIBK 作为萃取剂,经 SOLVENT 物流线流入萃取塔对乙酰丙酸进行萃取。在萃取塔中产生的酸性流经流股 S19 流入蒸馏塔 D2,最后含有硫酸的溶液流经流股 ACIDRECY 流出。萃取液流经流股 S18 进入粗馏塔 D1(模块 DISTL),实现乙酰丙酸的粗分离。绝大部分产品乙酰丙酸和萃取剂 MIBK 从塔顶流出,经流股 S20 进入精馏塔 D1。其中萃取剂从塔顶经流股 S22 进入混合器 M3 与流股 S25 混合,最后经流股 SOLVRECY 流出以回收萃取剂。由于挥发性较低,乙酰丙酸从精馏塔 D1 的塔底排出进入分离器(模块 SEP),分离其中的有机副产物如甲酸等以确保其纯度,这些有机副产物是厌氧消化的合适原料^[15]。有机残余物流经流股 S2,与流股 S11 混合后经流股 TO-AD 流出。纯化后的乙酰丙酸经换热器 H5 冷却至室温,最终得到质量分数为 99.2% 的产品乙酰丙酸。

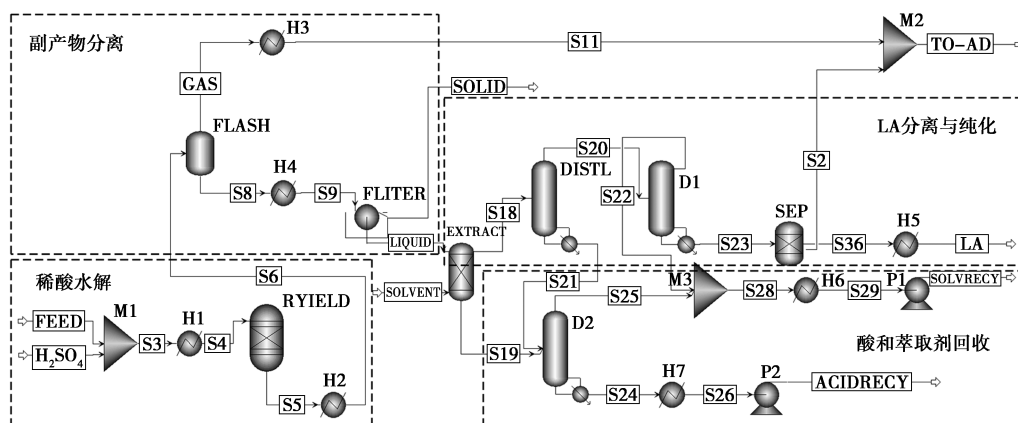


图 3 麦秆制备乙酰丙酸模拟流程图

1.2 副产物燃烧发电

在制备乙酰丙酸的工艺流程中,未反应的木质素等固体残渣可作为生物质燃料输送至生物质电厂进行燃烧发电。其工艺配置由生物质锅炉、凝汽器、汽轮机以及发电机组成^[16]。燃料的来源除了未反应的木质素、纤维素和半纤维素等生物质燃料外,还包括有机废水厌氧消化产生的沼气。生物质锅炉的热效率为 85%^[17]。一部分蒸汽用于供应工艺流程的热量需求,剩余蒸汽在蒸汽轮机中膨胀做功发电,在满足系统需求后,多余的电力可以进行售卖。

2 模拟结果

对上述设计的麦秆制取乙酰丙酸的工艺流程模

型进行严格的物料衡算,并对生产工艺中主要单元的操作参数进行说明。

2.1 物料衡算

物料衡算是基于质量守恒定律,对工艺流程的进、出物料进行质量分析,是进行化工设计、过程经济评价的基础。本研究为稳态模拟,所以不涉及物质的积累量,物料衡算公式为:输入+产生=输出+消耗。整个麦秆制备乙酰丙酸工艺流程的进出口物流的物料衡算情况见表 3。

根据 Aspen Plus 模拟得到的物流信息,对麦秆制取乙酰丙酸工艺流程进行了物料衡算。由表 3 中数据可知,在整个工艺中小麦秸秆进料量为 17 857 kg/h,最终得到质量分数为 99.2% 的产品乙酰丙

表 3 Aspen Plus 模拟麦秆制取乙酰丙酸工艺流程

物料衡算					
输入流股	流股描述	质量流量/ (kg·h ⁻¹)	输出流股	流股描述	质量流量/ (kg·h ⁻¹)
FEED	小麦秸秆	17857	TO-AD	厌氧发酵	76730.90
H ₂ SO ₄	硫酸	107143	SOLID	木质素等	4883.60
SOLVENT	萃取剂	250402	LA	乙酰丙酸	2372.84
			SOLVRECY	萃取剂回收	256003.00
			ACIDRECY	酸液回收	35393.00
合计		357402			375402.00

酸,其质量流量为 2 372.84 kg/h,即小麦秸秆与乙酰丙酸产品的质量比为 7.53:1。此外,输入流股与输出流股的质量流量保持一致,说明该工艺流程满足质量守恒定律。

2.2 系统参数

乙酰丙酸制备流程中主要单元的操作参数如表 4 所示。

表 4 乙酰丙酸制备系统主要单元操作参数

名称	设备	模块	操作参数
RYIELD	产率反应器	RYield	反应温度 200℃,压力 2.5 MPa
FLASH	闪蒸罐	Flash2	温度 196℃,压力 1.4 MPa
FILTER	固液分离器	Filter	压力 0.48 MPa,温度 35℃
EXTRACT	萃取塔	Extract	塔板数 10,压力 0.3 MPa
D1	粗馏塔	RadFrac	塔板数 15,压力 0.1 MPa
D2	精馏塔	RadFrac	塔板数 15,回流比 3
P1	泵	Pump	出口压力 0.5 MPa,等熵效率 0.8
P2	泵	Pump	出口压力 2.5 MPa,等熵效率 0.8

生物质电厂的基本参数如表 5 所示。

表 5 生物质电厂基本参数

参数	数值
过量氧气系数	1.1
生物质燃料量/(kg·h ⁻¹)	4883.6
燃料低位发热量 ^[18] /(MJ·kg ⁻¹)	15.37
沼气流/(kg·h ⁻¹)	2128.3

沼气低位发热量 ^[19] /(MJ·kg ⁻¹)	15.56
蒸汽压力/MPa	5
蒸汽温度/℃	500
蒸汽流量/(t·h ⁻¹)	31.2
汽耗率/[kg·(kW·h) ⁻¹]	3.03
发电功率/MW	10.3

沼气的生成量是按照 TO-AD 流股中有机物质质量的 91%在厌氧发酵过程中被消耗掉,其中 85%被转化成沼气计算得出^[11]。蒸汽流量由式(1)、(2)确定:

$$E = \eta_b \times (q_{m,燃料} \times L_{燃料} + q_{m,沼气} \times L_{沼气}) \quad (1)$$

$$q_{m,蒸汽} = E / [C_p \times (T_s - T_w) + \Delta h + (h_{sup} - h_v)] \quad (2)$$

式中: E 为锅炉从燃料和沼气中提取的能量,MW; η_b 为锅炉效率; $q_{m,燃料}$ 为生物质燃料的质量流量,kg/h; $L_{燃料}$ 为生物质燃料的低位发热量,MJ/kg; $q_{m,沼气}$ 为沼气的质量流量,kg/h; $L_{沼气}$ 为沼气的低位发热量,MJ/kg; $q_{m,蒸汽}$ 为蒸汽的质量流量,t/h; C_p 为水的比热容,kJ/(kg·℃); T_s 为 5 MPa 时蒸汽的饱和温度,℃; T_w 为锅炉给水温度,℃; Δh 、 h_{sup} 和 h_v 分别为水的汽化热、过热蒸汽的比焓、饱和蒸汽的比焓,kJ/kg。物性参数如表 6 所示。

表 6 计算蒸汽流量所需的物性参数

物性参数	含义	数值
C_p /(kJ·kg ⁻¹ ·℃ ⁻¹)	水的比热容	4.2
T_s /℃	蒸汽的饱和温度	264
T_w /℃	锅炉给水温度	105
Δh /(kJ·kg ⁻¹)	水的汽化热	1639.6
h_{sup} /(kJ·kg ⁻¹)	过热蒸汽比焓	3433.7
h_v /(kJ·kg ⁻¹)	饱和蒸汽比焓	2794.2

3 结果与讨论

3.1 能量分析

为了便于直观展示系统中的能量流动过程,绘制了系统中各部分的能量流动如图 4 所示。

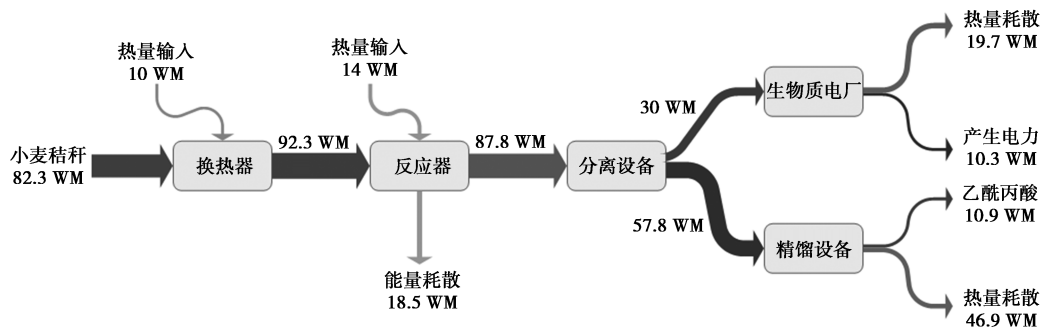


图 4 系统能量流动图

对于生物质电厂,为简化分析进行以下假设^[19]:①分别将环境温度和压力恒定为 25.0℃和 101.325 kPa,系统稳态运行;②锅炉排烟温度恒定,锅炉效率不变;③进料速率和发电功率保持恒定,即发电效率保持不变。

生物质电厂净发电效率为:

$$\eta_e = P_e / (q_{m,燃料} \times L_{燃料} + q_{m,沼气} \times L_{沼气}) \quad (3)$$

式中: P_e 为发电功率,MW。

已知条件如下:发电功率为 10.3 MW;生物质燃料的质量流量为 4 883.6 kg/h,低位发热量为 15.37 MJ/kg;沼气的质量流量为 2 128.3 kg/h,低位发热量为 15.56 MJ/kg。计算可得净发电效率为 34.3%。

3.2 经济性分析

使用动态投资回收周期和净现值评价新系统的盈利能力与经济可行性。通常,系统的动态回收周期越短,净现值越高,其经济表现越好^[20]。计算公式如下:

$$C_{NPV} = \sum_{y=1}^n [(C_{in} - C_{out}) / (1 + i_{dis})^y] \quad (4)$$

$$\sum_{y=1}^{DPP} [(C_{in} - C_{out}) / (1 + i_{dis})^y] = 0 \quad (5)$$

式中: C_{NPV} 为净现值,元; n 为项目周期,年; y 为项目实施的年数,年; C_{in} 为第 y 年的资金流入,元; C_{out} 为第 y 年的资金流出,元; i_{dis} 为贴现率;DPP 为动态回收周期,年。

本系统的资金投入包括设备投资成本和运维成本。收入来源为乙酰丙酸和电力的售卖。新系统中涉及的设备可以根据工艺要求进行精确设计,也可以参照现有的设备模型,按照设备尺寸进行相应折算^[21]。新设备的成本按照规模因子法进行换算,其计算方法如公式(6)^[8]所示:

$$C_2 = C_1 \times (S_2/S_1)^f \quad (6)$$

式中: C_1 为现有设备的成本,元; C_2 为换算后新设备的成本,元; S_1 为现有设备的参数; S_2 为新设备的参数; f 为设备的尺寸因子。

根据文献中相关参数^[8,11,19,21],按照公式(6)进行计算可得到各设备的成本,如表 7 所示。

表 7 经济性分析基本参数

设备名称	$S_1 /$ ($\text{kg}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$)	$C_1 /$ 万元	$S_2 /$ ($\text{kg}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$)	f	$C_2 /$ 万元
传送装置	870.0	1.3	17857.0	0.6	8.2
原料破碎机	870.0	3.3	17857.0	0.8	36.9
硫酸储罐	326.0	1.1	2142.9	0.7	4.1

反应器	310755.0	5225.8	125000.0	0.6	3025.9
闪蒸罐	62556.1	69.2	125000.0	0.7	112.3
换热器	69788.4	116.2	76730.8	0.7	124.2
压滤机	91021.5	482.7	50701.6	0.8	302.3
精馏塔	60001.8	2153.6	260830.0	0.6	5200.9
乙酰丙酸储罐	870.0	6.7	2391.6	0.7	13.6
混合器	90841.7	80.7	76730.8	0.5	71.2
泵	59788.4	12.2	35593.0	0.8	8.1
厌氧发酵器	90841.7	2653.8	76730.8	0.7	2358.0
沼气储罐	14727.0	1065.2	2128.3	0.7	275.0

对于生物质电厂,可对现有锅炉进行改造,其费用为 300 万元^[22]。与表 7 中所得到的各设备成本相加即可得到总的设备投资成本。

本系统进行经济性分析的基本参数如表 8 所示。

表 8 经济性分析基本参数

项目	数值
设备总投资/万元	11840.7
运维成本(总投资 20%) ^[23] /万元	2368.14
乙酰丙酸售价 ^[7] /(元·t ⁻¹)	6500
电力售价 ^[24] /(元·kW ⁻¹ ·h ⁻¹)	0.87
年总运行时间 ^[25] /h	5000
建设周期/a	2
运行年限/a	20
贴现率/%	12
1~3 年所得税率/%	0
4~6 年所得税率/%	12.5
7~20 年所得税率/%	20

在施工期间,项目的资金流入 C_{in} 为零。在运行年限期间,每年的资金流入为:

$$C_{in} = M_{LA} \times N \times C_{LA} + P_e \times N \times C_e \quad (7)$$

式中: M_{LA} 为每小时生产的乙酰丙酸量,t; N 为系统的年运行时间,h; C_{LA} 为乙酰丙酸的售卖价格,元/t; C_e 为电力售价,元/(kW·h)。

在建设期间,项目资金流出等于建设期的设备总投资,其中第一年支出占 60%,第二年占 40%。在运行年限内,每年的资金流出 C_{out} 为:

$$C_{out} = C_y + C_{it} \quad (8)$$

式中: C_y 为运维成本,元; C_{it} 为所得税,元。

由上述公式计算得到的经济性分析结果如表 9 所示。由表 9 可知,该系统的动态回收周期为 3.57 年,净现值为 37 961 万元,具有较为可观的经济效益。

表9 经济性分析结果

参数	数值
乙酰丙酸年产量/t	11864.2
乙酰丙酸年获利/万元	7711.7
年发电量/(kW·h)	5150000
发电年获利/万元	4480.5
总获利/万元	12192.2
动态回收周期/a	3.57
净现值/万元	37961

4 结论

提出了一种利用农业固体废弃物小麦秸秆制取乙酰丙酸系统,并利用反应后的木质素等生物质固体残渣以及有机废水厌氧发酵后产生的沼气作为燃料,与生物质电厂进行耦合,尽可能减少工艺流程中废物的生成,降低处理成本并发电,从而促进生物质的资源化利用以及农业的可持续发展。

(1)利用 Aspen Plus 软件对麦秆制备乙酰丙酸的工艺流程进行设计并模拟,最终得到质量分数为 99.2% 的产品乙酰丙酸,原料小麦秸秆与产品乙酰丙酸的质量之比为 7.53:1。

(2)通过系统分析可知,生物质电厂的发电功率为 10.3 MW,每年生产的乙酰丙酸量为 11 864.2 t,生物质电厂净发电效率为 34.3%。

(3)通过经济性分析可知,该系统的动态回收周期为 3.57 年,净现值为 37 961 万元,具有较为可观的经济效益。

参考文献

- [1] Ukawa-Sato R, Hirano N, Fushimi C. Design and techno-economic analysis of levulinic acid production process from biomass by using co-product formic acid as a catalyst with minimal waste generation [J]. *Chemical Engineering Research and Design*, 2023, 192: 389-401.
- [2] 廖一嘉. 双碳目标下燃煤-生物质耦合发电改造项目决策研究 [D]. 北京: 华北电力大学, 2023.
- [3] Li G, Du G, Liu G, *et al.* Study on the dynamic characteristics, control strategies and load variation rates of the concentrated solar power plant [J]. *Applied Energy*, 2024, 357: 122538.
- [4] 杨佳鑫, 司传领, 刘坤, 等. 木质纤维生物质制备乙酰丙酸及其应用综述 [J]. *林业工程学报*, 2020, 5(5): 21-27.
- [5] Wei H, Wei X, Zhou X, *et al.* Pore-scale study of phase transitions and humins coking in cellulose hydrolyzed to levulinic acid [J]. *Fuel*, 2024, 360: 130506.
- [6] Badgujar K C, Wilson L D, Bhanage B M. Recent advances for sustainable production of levulinic acid in ionic liquids from biomass: Current scenario, opportunities and challenges [J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2019, 102: 266-284.
- [7] Kapanji K K, Haigh K F, Gørgens J F. Techno-economics of lignocellulose biorefineries at south african sugar mills using the biofine process to co-produce levulinic acid, furfural and electricity along with gamma valeractone [J]. *Biomass and Bioenergy*, 2021, 146: 106008.
- [8] Wan Y K, Sadhukhan J, Ng K S, *et al.* Techno-economic evaluations for feasibility of sago-based biorefinery, part 1: Alternative energy systems [J]. *Chemical Engineering Research & Design*, 2016, 107: 263-279.
- [9] 常春. 生物质制备新型平台化合物乙酰丙酸的研究 [D]. 杭州: 浙江大学, 2006.
- [10] 苏家磊. 牛粪转化为乙酰丙酸类化学品和碳基固体酸催化剂研究 [D]. 北京: 中国农业科学院, 2018.
- [11] 杨娟. 纤维素乙醇的工艺流程模拟及技术经济分析 [D]. 大连: 大连理工大学, 2014.
- [12] 方君基. 麦秆催化转化制备乙酰丙酸 [D]. 徐州: 中国矿业大学, 2016.
- [13] Hayes D J. An examination of biorefining processes, catalysts and challenges [J]. *Catalysis Today*, 2009, 145(1): 138-151.
- [14] Mukherjee A, Dumont M, Raghavan V. Review: Sustainable production of hydroxymethylfurfural and levulinic acid: Challenges and opportunities [J]. *Biomass and Bioenergy*, 2015, 72: 143-183.
- [15] Chen H, Li J, Li T, *et al.* Performance assessment of a novel medical-waste-to-energy design based on plasma gasification and integrated with a municipal solid waste incineration plant [J]. *Energy*, 2022, 245: 123156.
- [16] 卢荻, 陈衡, 刘一帆, 等. 与生物质电站和燃料电池耦合的医疗固废等离子汽化负碳排放发电系统的设计研究 [J]. *现代化工*, 2023, 43(10): 222-229.
- [17] Thornley P, Upham P, Huang Y, *et al.* Corrigendum to "integrated assessment of bioelectricity technology options" [energy policy (37) 890-903] [J]. *Energy Policy*, 2010, 38(1): 689.
- [18] 梁慧. 基于 AspenPlus 的零排放生物质发电系统模型构筑 [D]. 北京: 华北电力大学, 2009.
- [19] 李娟, 李稼睿, 孙文, 等. 厌氧发酵与焚烧耦合的新型垃圾发电系统 [J]. *动力工程学报*, 2023, 43(6): 768-779.
- [20] Chen H, Zhang M, Wu Y, *et al.* Design and performance evaluation of a new waste incineration power system integrated with a supercritical CO₂ power cycle and a coal-fired power plant [J]. *Energy Conversion and Management*, 2020, 210: 112715.
- [21] 王丽. 不同预处理工艺生产纤维素乙醇的技术经济分析 [D]. 大连: 大连理工大学, 2015.
- [22] 朱轶林, 王永真, 张新敬, 等. 生物质有机朗肯循环热电联供系统的热经济分析 [J]. *太阳能学报*, 2021, 42(12): 312-319.
- [23] 贾承宇, 张钟, 陈衡, 等. 基于电解水制氢和甲醇合成/重整的零碳新能源消纳系统 [J]. *现代化工*, 2023, 43(8): 219-223.
- [24] 徐钢, 张钟, 吴志聪, 等. 基于绿氢和生物质富氧燃烧技术的零碳甲醇合成系统 [J]. *动力工程学报*, 2022, 42(10): 925-932.
- [25] Morakile T, Mandegari M, Farzad S, *et al.* Comparative techno-economic assessment of sugarcane biorefineries producing glutamic acid, levulinic acid and xylitol from sugarcane [J]. *Industrial Crops and Products*, 2022, 184: 115053. ■