DOI: 10. 3969/j. issn. 2097-0706. 2023. 07. 004

# 工业共生体系下生物质资源化利用的物质 能量流分析

Analysis of material and energy flows in biomass resource utilization under industrial symbiosis system

吴形<sup>1,2</sup>,王守鑫<sup>3</sup>,程星星<sup>1,2\*</sup>,刘坤坤<sup>1,2</sup> WU Tong<sup>1,2</sup>, WANG Shouxin<sup>3</sup>, CHENG Xingxing<sup>1,2\*</sup>, LIU Kunkun<sup>1,2</sup>

(1.山东大学 能源与动力工程学院,济南 250061; 2.燃煤污染物减排国家工程实验室,济南 250061; 3.华电青岛 热力有限公司,山东 青岛 266031)

(1.School of Energy and Power Engineering, Shandong University, Jinan 250061, China; 2.Engineering Laboratory for Reducing Emissions from Coal Combustion, Jinan 250061, China; 3.Huadian Qinhdao Heat-Supply Company Limited, Qingdao 266031, China)

摘 要:在全球化石能源日益紧张的背景下,以电力、生物燃料为代表的生物能源得到广泛生产。但由于原料收集 困难以及经济可行性问题,难以提升产业规模。工业共生是实现资源有效利用的可持续发展模式。在工业共生视 角下,以生物质热电联产(CHP)厂、生物乙醇厂、厌氧消化(AD)厂、生物油精炼厂、水泥厂为协同对象,对生物质资 源化利用的4种协同模式进行了物质能量流分析,并在此基础上进行了能效和经济性分析结果表明,工业共生体系 有利于提高生物质产业之间的资源再利用,减少废物浪费。在生物质秸秆供应量为13.73 th,生物乙醇产量为660 L/h,生物油产量为1.01 t/h,AD的沼气产量为275 m<sup>3</sup>/h,水泥产量67.68 t/h的前提下,通过废物和副产品的再利用,4 种协同模式分别额外产生了0.36,2.93,3.47,6.54 MW·h的电力以及1365.8,4 548.8,2 883.2 和 948.4 MJ的热力。 4种协同模式运行下能量利用效率比各工厂单独运行时分别变化了-2.66%,11.96%,4.15%和9.40%。每年可分别 节约原料收集和运输成本约45.4,369.2,437.2,824.0 万元。这项工作为生物质工业之间协同发展提供了详细的数 据参考。

关键词:生物质能;工业共生;协同模式;物质能量流;废物再利用;热电联产

中图分类号:TK 01 文献标志码:A 文章编号:2097-0706(2023)07-0030-10

**Abstract:** Under the growing global shortage of fossil energy, bioenergy represented by biomass power and biofuels has been widely applied. However, its industry scale is hindered by the difficulty in raw material collecting and the economic feasibility. Industrial symbiosis is a sustainable development way to efficiently use various resources. From the perspective of industrial symbiosis, taking biomass cogeneration plants, bioethanol plants, anaerobic digestion (AD) plants, bio-oil refineries and cement plants as collaborative objects, the material and energy flows in biomass resource utilization are studied under four synergistic modes. Energy efficiency and economy analyses are carried out based on the study. The results show that the industrial symbiosis system is beneficial to resource reuse in biomass industry and waste reduction. In a case study, with a biomass straw supply at 13.73 t/h, the plants above could yield 660 L/h bioethanol, 1.01 t/h bio-oil, 275 m<sup>3</sup>/h biogas and 67.68 t/h cement . Through the reuse of wastes and by-products, the industrial symbiosis system cogenerated 0.36, 2.93, 3.47 h or 6.54 MW h electric power, and 1 365.8, 4 548.8, 2 883.2 or 29 489.4 MJ heat under four synergistic modes. The energy utilization efficiencies of the system in four synergistic modes differed from that of the plants in independent operation mode by -2.66%, 11.96\%, 4.15\% and 9.40\%, respectively. The cost of raw material collection and transportation were saved by around 454 000, 3 692 000, 4 372 000 and 82 40 000 Yuan per year, respectively. This

基金项目:山东省自然科学基金(ZR2020ME190);山东省重 点研发计划项目(2020CXGC011402) study provides reference data for the synergistic development of biomass industries.

**Keywords:** biomass energy; industrial symbiosis; synergistic mode; material and energy flow; waste reuse; CHP

Shandong Provincial Natural Science Foundation(ZR2020ME19
0); National Key R&D Program of Shandong Province
(2020CXGC011402)

# 0 引言

近年来,全球化石能源供应紧张,其利用而产 生的排放日益加剧<sup>[1]</sup>。《京都协议书》和《能源政策 法》等有关环境法规的相继出现,增加了人们寻找 可再生、可替代能源的积极性。其中,生物质能作 为世界第四大能源,在世界各国能源消费中的比例 逐渐增加<sup>[2]</sup>。其作为可再生能源,在一定程度上可 以满足能源需求或补给<sup>[3]</sup>。

以电力(生物质发电)、生物燃料(主要为生物 乙醇和生物柴油)为代表的生物能源得到广泛生 产。其在生产过程会产生更少的NO<sub>x</sub>,SO<sub>2</sub>和温室气 体排放<sup>[4]</sup>。但生产过程的主要问题是经济可行性。 例如:小型气化发电、生物乙醇生产、生物质制氢等 成本目前很高。这些过程对生物质的消耗是巨大 的,而多数生物质秸秆堆积密度较低,难收集<sup>[5]</sup>。收 集和运输阶段的能耗和成本限制了每年的固定收 集量,产生的废物难以被利用<sup>[6]</sup>,很难形成较大的生 物质产业规模,因此只有设计出高效的供应链或者 可持续的协同发展模式,才是可行的<sup>[7-8]</sup>。

工业共生已被证明是实现区域资源有效利用、 减少碳排放的有效发展模式[9-10]。其定义为"传统 上独立的实体以集体方式获得竞争优势,包括材 料、能源、水和副产品的物理交换"[11]。即传统的公 司企业合作,共享服务和资源,以减少废物浪费和 成本,从而增加利益和减少环境影响。其中,邻近 性是促进企业协同共生效应的一个关键因素,因为 其有着相同的原料来源和同类型的废物,有利于同 等的处理和转化,和降低运输管理成本。其中我国 天津的案例,涉及污水处理、火电厂、制药、造纸和 水泥等协同作用<sup>[12]</sup>。在贵阳实施的城市产业共生, 每年可减少约1090万t的温室气体排放<sup>[13]</sup>。辽宁 鞍钢提出了建立以钢铁为主导的工业园区,与之关 联的行业有采矿、电力、焦化和机械制造,其中废物 处理和再循环的产业链解决了其存在废渣难处理 的问题<sup>[14]</sup>。济南钢铁与周边铝工业、氨加工和水泥 建筑等形成共生网络大大提高了资源利用率,并与 周边社区形成了城市工业共生<sup>[15]</sup>。Gonela等<sup>[16]</sup>提出 了生物质产业共生的概念,试图建立一个有效合作 框架来提高生物乙醇的产量。

然而工业共生案例并非全是成功的。需要对 共生产业的运行情况进行分析与评价。目前对共 生网络的研究分析方法非常多样化<sup>[17]</sup>。例如对影 响共生效应的障碍和驱动因素的定性分析。其中 王春燕等<sup>[18]</sup>对影响迁安市工业共生的因素进行了 定性分析,通过得分矩阵的结果得到主要影响因素 为信息效应和技术效应。生命周期评估是分析共 生模式下环境优势的最常用方法。Daddi等<sup>[10]</sup>对意 大利的一个中小制革厂集群进行了评估,并得到了 其在气候变化和陆地富营养化方面具有积极效应。 能值分析则是评估自然社会生态系统对协同效应 的环境贡献。Dong等<sup>[19]</sup>对沈阳经济开发区进行了 能值分析,提高可再生能源比例可有效降低总消 耗,改善环境绩效。基于投入产出法的混合LCA模 型是计算碳足迹和能耗的常用方法。李嘉祺等<sup>[20]</sup> 对一个多能耦合的工业园区进行了详细的碳足迹 计算。还有不少案例工业共生的经济成本进行了 评估,包括成本核算、投资回收率和经济收 益等<sup>[21-22]</sup>。

然而,少有研究将生物质能资源化利用的工业 共生模式进行分析与评价。本文以生物质热电联 产(Combined Heat and Power, CHP)厂、生物乙醇厂、 厌氧消化(Anaerobic Digestion, AD)厂、生物油精炼 厂、水泥厂为协同对象。基于物流分析方法,计算 分析了不同协同模式下的物质和能量流,并在此基 础上进行能效和经济性分析,为生物质工业之间协 同发展提供详细的数据参考和指导。

# 1 系统与方法

# 1.1 研究对象和方法

本文提出了一种生物质能产业之间的共生体 系。根据工业之间的"邻近性"原则,并结合实际可 调查的对象,选取了生物质利用的相关产业[17]。协 同对象包括生物质CHP厂、生物乙醇厂、AD厂、生 物油精炼厂、水泥厂。将它们的生产原料、产品、副 产品以及废物形成物流池,如图1所示。在保证正 常工业产品生产的情况下,最大限度地提高废物和 副产品的利用率。另外,在其他学者研究的基础 上,包括Gonela等<sup>[16]</sup>提出了生物质CHP厂、AD厂、 麦芽发酵厂、水泥厂组成的工业共生体系,意在通 过共生优势降低生物乙醇的生产成本。Jayasundara 等<sup>[23]</sup>提到了生物乙醇生产过程的废液可通过AD产 生用于CHP的沼气,产生的废弃木质素经过预处理 后可作为CHP的原料。Cusenza等<sup>[24]</sup>提到了AD与 CHP发电的协同运行。Schalkwyk等<sup>[25]</sup>提出的生物 油生产过程是与CHP联合运行的。将本文选取的 工业对象分为4种协同模式。

(1)生物质CHP厂和AD厂;

(2)生物质CHP厂、AD厂和生物乙醇厂;

(3)生物质 CHP 厂、AD 厂、生物乙醇厂和生物 油精炼厂;

(4)生物质CHP厂、AD厂、生物乙醇厂、生物油



Fig. 1 Logistics pool model under industrial symbiosis mode 精炼厂和水泥厂。

# 1.2 系统介绍

1.2.1 生物质电厂CHP

生物质发电厂采用整体气化联合循环CHP,主 要工艺流程如图2所示。经预处理后的生物质原料 被送入固定式气化炉,在炉内发生气化反应,转变 为可燃气体。可燃气体经过净化后,经燃气轮机驱 动电动机发电。其中燃气轮机产生的高温烟气加 热余热锅炉,产生高温蒸汽,驱动蒸汽轮机发电。 乏汽通过换热,可以为居民提供生活用水。考虑水 泵等部件的耗能为总电量的8%~12%。发电总效率为22.5%~28.0%,热电总效率为54.79%。

## 1.2.2 AD

AD 过程在连续搅拌的反应器槽中进行,在中 温度40℃的条件下,工艺流程如图3所示。

原料在进料罐中预混合,进入AD器后被机械 搅拌。该过程通过CHP系统产生的热能加热。输 出沼气和消化物,其中消化物的体积约为输入消化 器体积的90%~95%。

产生的沼气需要经过脱硫、过滤和除湿等净化 过程,储存于气罐中以供使用。剩余的消化物废液 废渣先通过热交换器对进料系统中的原料预热,然 后进入缓冲池,通过分离等操作以进行有机肥料的 加工。

1.2.3 生物乙醇厂

以稻草为原料。生物乙醇生产的主要流程如 图4所示。通过稀硫酸预处理,以去除木质素而获 得纤维素和半纤维素。然后对含有纤维素和半纤 维素的液相进行酶水解以转化为葡萄糖、木糖等。 并使用压滤机将木质素、灰分等固相分离出来,以 作为热和电力的燃料源。

剩余的酸性糖溶液使用 Ca(OH)<sub>2</sub>进行中和,中 和后的溶液在酵母和(NH<sub>4</sub>)<sub>2</sub>HPO<sub>4</sub>的存在下进行糖 化和发酵,以获得稀释的乙醇溶液,并使用蒸馏的 方法进一步纯化。其中,在蒸馏塔中获得的洗涤废 液,通过 AD 反应器可以产生沼气。中和产生的石 膏可用作田中肥料。





1.2.4 生物油精炼厂

生物质热解在 500 ℃和1个大气压下操作的 5 th 连续回转窑反应器中进行,具体工艺流程如图 5 所示。生物质在高效研磨机中从 2 cm 研磨到 2 mm,然后在 130 ℃下与热烟气直接接触干燥。处理 完的生物质原料送入热解反应器内。其中热解所 需的热量是通过燃烧热解产物(生物炭和不凝性气 体)所提供的。热解后,固体和挥发物立即在旋风 分离器中分离。部分产生的焦炭被送往燃烧室进 行热回收,而大部分被送往生物质预热器预处理。 挥发物则通过冷凝器进冷凝回收,其温度依次设置 为 80,60,40,20 ℃,将生物油在所有含水馏分中分 离出来。该过程产生的所有废水经专门的污水处 理系统进行处理。



# 1.2.5 水泥厂

水泥的基本生产过程分为3个生产阶段:原料制备、熟料生产和水泥粉磨,如图6所示。石灰石等 在破碎机中缩小到合适的尺寸,与铁、粘土或二氧 化硅等其他材料一并送入研磨机。研磨过程中,将 热空气和原料同时送入研磨位置,进行干燥和研 磨。然后,从磨机中取出的新鲜生料被输送到分类 器,该分类器用于将细磨颗粒与粗颗粒分离。尺寸 不合适的材料返回磨机,而细颗粒则被输送到生料 筒仓中进行混合。制成的生料在料筒中与空气进 行充分混合。混合后的生料需先经过预热再进入 窑炉,可除去大部分灰尘。在窑炉中,生料将被熔 化并融合在一起,形成熟料。熟料在经过冷却系统 的多级冷却后,与石膏等材料充分研磨混合形成 水泥。



Fig. 6 Cement production process

## 2 各工厂物料清单

各个工厂的生产数据时是根据实际调研和查 阅相关文献得到的,见表1。

## 3 结果与讨论

## 3.1 不同协同模式下物流分析结果

本研究假设每个工厂每天的生物质秸秆供应 量不变,工厂的每日产品量恒定。即生物质秸秆供 应量为13.73 t/h,生物乙醇产量为660 L/h,生物油 产量为1.01 t/h,AD的沼气产量为275 m³/h,水泥产 量67.68 t/h。且所有工厂均为24 h 正常运行。生物 质发电厂是园区中最主要的租户,可以为其他工业 提供足够的电力和热力。并在保障其他工业产品 正常生产的前提下,多余电量供给电网,多余热量 供给热用户。其在单独运行时每小时产生4.8 MW·h的电力和18 130 MJ 热力(非满负荷)。生物 质 CHP厂的热电负荷-效率曲线如图7所示。不同 工业协同配置的物流结果如图8—11所示。

模式1选择了生物质电厂和AD厂为协同对象。 物流结果见表2。其中,在生物质秸秆流量为5.18 t/h的情况下,电厂每小时电力输出为5.2 MW·h,热 力输出为19 629 MJ,同时还产生了0.29 t/h 灰分。 这里的热主要是经过余热锅炉、汽轮机发电之后的

		Т	able 1 Bill of mate	erials for each facto	ry		
<del></del>	输入				输出		
	项目	单位	数值	项目	Y         箱出         単位         m³/m³         kg/m³         m³/m³         kg/m³         kg/h         MJ/h         MW         t/h         m³/d         t/h         t/h         t/h         t/h         t/h         t/h         t/h	数值	一 米你
	热	MJ/m <sup>3</sup>	16 378.40	沼气	m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup>	113.29	
	电力	MW	7 936.40	固体废物	kg/m <sup>3</sup>	4 055.61	
	秸秆	t/m <sup>3</sup>	5.85	废水	m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup>	18.25	· · · · · · · · · · · · · · · · · · ·
生物乙醇厂	过程水	kg/m <sup>3</sup>	13 446.00	石膏	kg/m <sup>3</sup>	1 117.00	[23, 26, 27]
	循环水	kg/m <sup>3</sup>	2 268.00	生物乙醇	kg/h	88 542.00	
	稀硫酸	kg/m <sup>3</sup>	636.00				
	$Ca(OH)_2$	kg/m <sup>3</sup>	481.00				
	秸秆	t/h	2.40	热	MJ/h	9 580.00	[28-31]
生物质CHP厂	秸秆热值	MJ/kg	14.90	电力	MW	2.780	
	合成气	t/h	6.07	灰分	1 y         輸出         単位         m³/m³         kg/m³         m³/m³         kg/m³         kg/m³         kg/h         MJ/h         MW         t/h         m³/d         t/h         t/h         t/h         t/h         t/h         t/h         t/h      t	0.13	
	秸秆	t/h	4.69	生物油	t/h	1.01	
中期油糖样厂	热量	MJ/h	20 520.00	生物炭	t/h	1.13	
生物油相称	水	t/h	6.50	灰分	t/h	可忽略	[25, 32, 33]
	电力	MW	0.210	废水	输出         单位         m³/m³         kg/m³         m³/m³         kg/m³         kg/m³         kg/m³         kg/m³         kg/m³         kg/m³         kg/h         MJ/h         MW         t/h         t/h	5.30	
	粪便	t/d	14.00	沼气	m³/d	6 605.00	[24, 24]
AD)	固体废物	t/d	70.50	废液废渣	t/d	76.65	[24, 34]
	石灰石	t/h	163.80	水泥	t/h	135.36	
	黏土	t/h	4.79	废气	t/h	648.37	
	空气	m³/h	786.44	高低温蒸汽	t/h	204.40	[25, 26]
八池	煤	t/h	14.89	灰尘	t/h	20.06	[33, 36]
	石膏	t/h	6.80	热力	MJ/h	16 560.00	
				电力	MW	13.800	

	表1	各工厂物料清单	
Table 1	Bill	of materials for each f	actor

注: AD中的物质输入组分为: 树渣 0.70 t +乳清(乳业加工副产品) 8.40 t+粪便 2.80 t+食品加工废弃物(木质素托盘等) 4.00 t+饲料 1.00 t。



图7 生物质CHP厂机组效率-负荷曲线









废热,在能量可用性的角度考虑,仅能供应较低温 度范围的热量。AD过程,粪便和其他固体废物的 供应流量分别为0.58 t/h和2.94 t/h,这取决与附近 生活区的厨余垃圾产量,所需的电力为每小时 0.036 MW·h。其主要耗电部件为机械搅拌机。所 需热力为每小时133.20 MJ,来维持其40℃的反应 环境。每小时产生275.00 m<sup>3</sup>的沼气以及3.20 t的 废液废渣。气体主要成分为甲烷,通过生物质电厂 可额外产生0.400 MW·h的电力和1499.00 MJ的



图10 协同模式3物质能量流

Fig. 10 Matter and energy flows in synergistic mode 3

热量,这略低于 Maria 等<sup>[24]</sup>报道的电力和热量产出, 主要原因在于发电系统的不同。最终每小时供应 电网的电力为5.160 MW·h,通向热用户的热量为 19 495.80 MJ。模式2在模式1的基础上增加了生 物乙醇厂。以农林废弃物的纤维素为原料的第二 代生物乙醇交通能源领域被认为发展潜力巨大。 然而受目前生产技术的影响,不具备经济性。该模 式下可通过电力和热力节约,以及产生的副产品和 废物回收利用来降低生物乙醇的生产成本。物流 结果见表3。其生物乙醇每小时产量为660 L,所需 生物质秸秆供应量为3.86 t/h,所需的电力和热力分 别为1.460 MW·h 和 10 800.00 MJ。同时需要 419.76 kg/h 的稀硫酸和317.46 kg/h 的 Ca(OH)<sub>20</sub>



Fig. 11 Matter and energy flows in synergistic mode 4

产生的副产品有沼气,石膏和木质素残留物,以及 12.00 m<sup>3</sup>/h的废水。其中产生的沼气量为74.77 m<sup>3</sup>/h,通入生物质电厂中可额外产生0.150 MW·h 电力和542.00 MJ热力。产生的木质素残留物为 2.67 t/h,经过预处理后通入电厂,可额外产生 3.440 MW·h的电力和12 521.20 MJ热力,同时增 加0.19 t/h的灰分产生。这与Piyumali等<sup>[23]</sup>的计算 相比,提供了更精确的计算结果,因为沼气与木质 素在气化发电过程的利用效率是不同的。最终每 小时供应电网的电力为7.730 MW·h,通向热用户 的热量为22 678.80 MJ。

Table 2 Analysis results of material and energy nows in synergistic mode 1						
模式	能源	流量	$Q_{ m LHV}$	热量/(MJ·h <sup>-1</sup> )	电力/(MW・h)	
	秸秆	5.18 t/h	14 900.00 MJ/t	18130.00	4.800	
生物质CHD厂 AD厂	沼气(a)	$275.00 \text{ m}^{3}/\text{d}$	17.64 MJ/m <sup>3</sup>	1499.00	0.400	
生初灰CHF)、AD)	粪便/食品残余物	0.58 t/h /2.94 t/h	—	-133.20	-0.036	
		总计		19 495.80	5.160	

表 2 协同模式 1 物质能量分析结果 2 Analysis results of material and energy flows in synargistic mo

± ^		と日
<del>.</del> .	动向模式力如应能量分析	Z는 보니
48.1		

Fahle 3	Analysis results	of material and	energy flows in	synergistic mode 2
		VI IIIUVIIUI UIIV		orner cloue moue

模式	能源	流量	$Q_{ m LHV}$	热量/(MJ·h <sup>-1</sup> )	电力/(MW・h)
	秸秆	5.18 t/h	14 900.00 MJ/t	18 979.00	5.200
	沼气(a)	275.00 m <sup>3</sup> /h	17.64 MJ/m <sup>3</sup>	1 569.80	0.437
	沼气(b)	74.77 m <sup>3</sup> /h	22.40 MJ/m <sup>3</sup>	542.00	0.150
生物质CHP厂、AD厂、生 物乙醇厂	粪便/食品残余	0.58 t/h /2.94 t/h	—	-133.20	-0.036
	秸秆(b)	3.86 t/h	14 900.00 MJ/t	-10 800.00	-1.460
	木质素残留物	2.68 t/h	19 000.00 MJ/t	12 521.20	3.440
_		总计		22 678.80	7.730

模式3在模式2的基础上增加了生物油精炼 厂。生物质油可作为液体燃料直接燃烧使用,也可 经过精致加工后作为内燃机燃料,从而代替柴油、 重油等。生物质热解在500℃的环境下进行。该模 式下,生物质发电厂可以为生物油生产提供所需的 热量。而热解的副产品又可以额外产生相应的电 力。物流结果见表4。生物油精炼厂的秸秆供应量 为4.69 t/h,所需电力为0.210 MW·h,产油量为 1.01 t/h,并且产生0.69 t/h的生物炭。

过程中产生的可燃气体和部分生物炭通往生物质 CHP 厂 而 产 生 热 解 所 需 要 的 热 量 。 与 Schalkwyk 等<sup>[25]</sup>的研究不同的是,这部分燃气还产生 了额外电力输出。而热解完后,产品回收区产生的 蒸汽又可以产生电力和热力。最终供应到电网的 电力为每小时 8.270 MW · h,供应到热用户的热力 为21 013.20 MJ/h。

模式4在模式3的基础上增加了水泥厂,即本 文所有的研究对象形成共生。这比Gonela等<sup>[16]</sup>提 出的生物质共生系统提供了更详细的物质流分析。 水泥厂中,生料在窑炉中烧制成熟料的过程消耗大 量的热。

因此也会产生的大量的高温蒸汽和废气。其中废气可用于供暖。物流结果见表5。这过程燃料煤的供应量7.445 t/h,石灰石供应量为81.90 t/h,黏 土消耗量为2.40 t/h,石膏消耗量为3.40 t/h,其中生 物乙醇厂产生的石膏可补偿一部分。每小时的水 泥产量为67.68 t,并产生102.20 t高温蒸汽和 324.00 t的废气,以及10.03 t的灰尘。其中高温蒸 汽通往余热锅炉每小时可产生24 840.00 MJ的热力 和2.300 MW · h的电力。最终供应到电网的电力为每 小时11.340 MW · h,供应到热用户的热力为 47 619.40 MJ/h。

	表 4	协同模式3物质能量分析结果
Cable 4	A	الم _ C

Table 4 Analysis results of material and energy hows in synergistic mode 5							
模式	能源	流量	$Q_{ m LHV}$	热量/(MJ·h <sup>-1</sup> )	电力/(MW・h)		
	秸秆	5.18 t/h	14 900.00 MJ/t	19 828.00	5.600		
	沼气(a)	275.00 m <sup>3</sup> /h	17.64 MJ/m <sup>3</sup>	1 640.60	0.470		
	沼气(b)	74.77 m <sup>3</sup> /h	22.40 MJ/m <sup>3</sup>	566.40	0.160		
	粪便/食品残余物	0.58 t/h /2.94 t/h	—	-133.20	-0.036		
	秸秆(b)	3.86 t/h	14 900.00 MJ/t	-10 800.00	-1.460		
生物质CHP)、AD)、生物 乙醇厂生物油精炼厂	秸秆(c)	4.69 t/h	14 900.00 MJ/t	-20 520.00(高温烟气)	-0.210		
	木质素/固体残留物	2.68 t/h	19 000.00 MJ/t	13 081.30	3.700		
	生物炭(c)	0.44 t/h	25.30 MJ/kg	2 859.80	—		
	可燃气(c)	0.81 t/h	11.50 MJ/kg	3 150.30	0.900		
	烟气补偿	_	—	-9 180.00	-0.855		
		总计		21 013.20	8.270		

注:产生的高温烟气不算在供应热量中。

#### 表5 协同模式4物质能量分析结果

 Table 5
 Analysis results of material and energy flows in synergistic mode 4

模式	能源	流量	$Q_{ m LHV}$	热量/(MJ · h <sup>-1</sup> )	电力/(MW•h)
	秸秆	5.18 t/h	14 900.00 MJ/t	20 677.00	6.000
	沼气(a)	275.00 m <sup>3</sup> /h	17.64 MJ/m <sup>3</sup>	1 712.40	0.500
	沼气(b)	74.77 m <sup>3</sup> /h	22.40 MJ/m <sup>3</sup>	591.20	0.174
	粪便/食品残余物	0.58 t/h /2.94 t/h	—	-133.20	-0.036
	秸秆(b)	3.86 t/h	14 900.00 MJ/t	-10 800.00	-1.460
生物质CHP厂、AD厂、生物	秸秆(c)	4.69 t/h	14 900.00 MJ/t	-20 52(高温烟气)	-0.210
乙醇厂、生物油精炼厂、水	木质素/固体残留物(b)	2.68 t/h	19 000.00 MJ/t	13 641.50	3.960
泥厂	生物炭(c)	0.44 t/h	25.30 MJ/kg	2 982.30	—
	可燃气(c)	0.81 t/h	11.50 MJ/kg	3 288.20	0.965
	高温蒸汽(d)	102.20 t/h	—	24 840.00	2.300
	煤、石灰石	7.445 t/h /81.90 t/h	29.30 MJ/kg	—	—
	烟气补偿	—	—	-9 180.00	-0.855
-		总计		47 619.40	11.340

# 3.2 能效分析结果

在能效计算过程中,不考虑未被利用的废物或 副产品的能量。生物质CHP厂、生物乙醇厂、生物 油精炼厂和水泥厂在单独运行时的能量利用效率 分别为45.87%,18.94%,70.72%和11.95%。AD 过程,由于无法获得用于发酵废物的具体能量,因 此无法具体计算。

4种工业协同模式下和其各自单独运行时的能

量利用效率对比如图 12 所示(单独运行是指该模式 下参与的工厂对象在单独运行时的总效率)。协同 运行时能量利用效率比各工厂单独运行时的总效 率分别增加了-2.66%,11.96%,4.15%和9.40%。 模式1协同运行效率低于各自独立运行的主要原因 在于,AD产生的沼气在协同模式下被用于生物质 CHP。能量由热能转化为电能,增加了能量转换环 节,因此效率有所降低。其中协同模式2和协同模 式4能量利用效率增加较多的原因在于,生物乙醇 生产过程产生的固废、木质素以及水泥生产过程产 生的高温蒸汽被得到了合理利用。



## 3.3 经济性分析结果

本共生体系通过就地利用废物和副产品,以减 少生产成本,增加利润。其中,以可燃气、高温蒸汽 为代表的副产品,和以固体废物、木质素、废气为代 表的废物,经过相应的预处理后被利用。从而减少 了收集、运输等成本。

经调查与测算,10 MW 左右规模的气化联合循 环发电,每年的设备折旧费用为247万元,土建费用 为63万元,设备安装费用为80万元,长运营成本为 409万元,秸秆到厂成本为258元/t(包括收集、运输 和预处理以及相关经纪人利润)。计算得到的发电 成本为0.48元/(kW·h)。其中,收集、运输和相关经 纪人利润的相关成本为0.21元/(kW·h)。若假设该 共生工业每年运行6000h,4种协同模式分别可节 约原料成本为45.4,369.2,437.2,824.0万元。

## 4 结论

本研究在工业共生视角下,对产业之间4种不同的协同模式进行了物质能量流分析,证实了该体系对资源再利用的有效性。结果表明:在生物质秸秆供应量为13.73 t/h,生物乙醇产量为660 L/h,生物油产量为1.01 t/h, AD的沼气产量为275.00

m³/h,水泥产量为67.68 t/h的前提下,通过废物和副 产品的再利用,4种协同模式下,每小时分别额外产 生了 0.360, 2.930, 3.470, 6.540 MW · h 的电力以及 1 365.80,4 548.80,2 883.20 和 29 489.40 MJ 的热 力。4种协同模式运行下能量利用效率比各工厂单 独运行时分别变化了-2.66%,11.96%,4.15%和 9.40%。通过就地利用废物和副产品,每年可分别 节约原料成本 45.4,369.2,437.2,824.0 万元。在 所有工厂形成共生时,废物回收利用量可达4.17 t/h,一定程度上减少了固废中重金属类物质、二噁 英等造成的土壤环境污染,然而仍旧存在一定的废 水废液排放,在后续研究中,共生体系可以增加污 水处理厂。本文通过物质能量流分析,为未来工作 提供了数据支持。未来工作包括但不限于:确定更 多候选的产业,以便降低生物质产品的产出成本; 基于能量、碳排放效应和经济性,对工业体系进行 评价和优化;探究供应链、产品市场、社会政策对共 生体系的影响。

## 参考文献:

- [1]LIU Z, LIU B, GUO J, et al. Conventional and advanced exergy analysis of a novel transcritical compressed carbon dioxide energy storage system [J]. Energy Conversion and Management, 2019, 198:111807.
- [2]GENG L, WANG Y, WANG Y, et al. Effect of the injection pressure and orifice diameter on the spray characteristics of biodiesel [J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering (English Edition), 2020,7(3):331-339.
- [3]YANG Y, TIAN Z, LAN Y, et al. An overview of biofuel power generation on policies and finance environment, biofuelsapplied, device and performance [J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering (English Edition), 2021,8(4):534-553.
- [4]XU X L, CHEN Y J. A comprehensive model to analyze straw recycling logistics costs for sustainable development: Evidence from biomass power generation [J]. Environmental Progress & Sustainable Energy, 2020, 39(4): e13394.
- [5]LI K, SONG J, DUAN H, et al. Integrated assessment of straw utilization for energy production from views of regional energy, environmental and socioeconomic benefits [J]. Journal of Cleaner Production, 2018, 190:787–798.
- [6]OBYDENKOVA S V, KOURIS P D, HENSEN E J M. Environmental economics of lignin derived transport fuels [J].Bioresour Technol, 2017,243:589–599.
- [7]CHOWDHURY T, CHOWDHURY H. Is the commercial sector of Bangladesh sustainable? —Viewing via an exergetic approach[J].Journal of Cleaner Production, 2019,

228:544-556.

- [8]MIRKOUEI A, HAAPALA K R, SESSIONS J, et al. A mixed biomass-based energy supply chain for enhancing economic and environmental sustainability benefits: A multi-criteria decision making framework [J]. Applied Energy, 2017, 206: 1088-1101.
- [9]MARTIN M, HARRIS S. Prospecting the sustainability implications of an emerging industrial symbiosis network[J]. Resources, Conservation and Recycling, 2018, 138: 246-256.
- [10]DADDI T, NUCCI B, IRALDO F. Using Life Cycle Assessment (LCA) to measure the environmental benefits of industrial symbiosis in an industrial cluster of SMEs[J]. Journal of Cleaner Production, 2017,147:157-164.
- [11]CHERTOW M R. Industrial symbiosis: Literature and taxonomy [J]. Annual Review of Energy and the Environment, 2000,25(1):313-337.
- [12]ZHANG Y, ZHENG H, CHEN B, et al. Social network analysis and network connectedness analysis for industrial symbiotic systems: Model development and case study[J]. Frontiers of Earth Science, 2012, 7(2):169–181.
- [13]FANG K, DONG L, REN J Z, et al. Carbon footprints of urban transition: Tracking circular economy promotions in Guiyang, China [J]. Ecological Modelling, 2017, 365: 30-44.
- [14] 鞍钢集团鞍山钢铁推出"1+6"产业规划[J]. 现代矿业, 2018(2):197.
- [15]鞠沾仑,金庆珍,张海昕,等.山东钢铁行业转型升级的 思考[C]//2014年山东省科协学术年会论文集.2014: 262-267.
- [16] GONELA V, ZHANG J. Design of the optimal industrial symbiosis system to improve bioethanol production [J]. Journal of Cleaner Production, 2014,64: 513-534.
- [17]NEVES A, GODINA R, AZEVEDO S, et al. A comprehensive review of industrial symbiosis [J]. Journal of Cleaner Production, 2019, 247(20):119113.
- [18] 王春燕, 王震. 迁安市工业共生的影响因素分析[C]// 2015年中国环境科学学会年会论文集. 2015:477-485.
- [19]DONG H, LIU Z, GENG Y, et al. Evaluating environmental performance of industrial park development: The case of Shenyang [J]. Journal of Industrial Ecology, 2018, 22 (6): 1402-1412.
- [20]李嘉祺,陈艳波,陈来军,等.工业园区综合能源系统低碳经济优化运行模型[J].高电压技术,2022,48(8): 3190-3200.

LI Jiaqi, CHEN Yanbo, CHEN Laijun, et al. Low-carbon economy optimization model of integrated energy system in industrial parks [J]. High Voltage Engineering, 2022, 48 (8):3190–3200.

[21] PARK J, PARK J M, PARK H S. Scaling-up of industrial

symbiosis in the Korean National Eco - Industrial Park Program: Examining its evolution over the 10 years between 2005 - 2014 [J]. Journal of Industrial Ecology, 2019, 23(1): 197-207.

- [22]CAO X, WEN Z, TIAN H, et al. Transforming the cement industry into a key environmental infrastructure for urban ecosystem: A case study of an industrial city in China[J]. Journal of Industrial Ecology, 2018, 22(4):881-893.
- [23] JAYASUNDARA P M, JAYASINGHET K, RATHNAYAKE M.Process simulation integrated life cycle net energy analysis and ghg assessment of fuel - grade bioethanol production from unutilized rice straw[J]. Waste and Biomass Valorization, 2022. 13(8):3689-3705.
- [24]CUSENZA M A, CELLURA M, GUARINO F, et al. Life cycle environmental assessment of energy valorization of the residual agro-food industry [J]. Energies, 2021, 14 (17):5491.
- [25]VAN SCHALKWYK D L, MANDEGARI M, FARZAD S, et al. Techno-economic and environmental analysis of biooil production from forest residues via non-catalytic and catalytic pyrolysis processes [J]. Energy Conversion and Management, 2020, 213: 112815..
- [26]RANGANATHAN P. Preliminary techno economic evaluation of 2G ethanol production with co-products from rice straw [J]. Biomass Conversion and Biorefinery, 2020 (3):3673-3686.
- [27]RATHNAYAKE M, CHAIREONGSIRIKUL T. Process simulation based life cycle assessment for bioethanol production from cassava, molassescane, and strawrice[J]. Journal of Cleaner Production, 2018,190:24-35.
- [28]ZHENG Y, LIU C, ZHU J, et al. Carbon footprint analysis for biomass - fueled combined heat and power station: A case study[J]. Agriculture, 2022, 12(8):1146.
- [29]CAVALCANTI E J C, CARVALHO M, DA SILVA D R S. Energy, exergy and exergoenvironmental analyses of a sugarcane bagasse power cogeneration system [J]. Energy conversion and management, 2020, 222: 113232.
- [30]CHEN H, XUE K, WU Y, et al. Thermodynamic and economic analyses of a solar-aided biomass-fired combined heat and power system[J]. Energy, 2021, 214: 119023.
- [31]YANG Q, ZHOU H, ZHANG X, et al. Hybrid life-cycle assessment for energy consumption and greenhouse gas emissions of a typical biomass gasification power plant in China[J].Journal of Cleaner Production, 2018: 661–671.
- [32]ZAINI I N , SOPHONRAT N , SJBLOM K , et al. Creating values from biomass pyrolysis in sweden: Co-production of H<sub>2</sub>, biocarbon, and bio-oil[J].Processes, 2021, 9(3):415.
- [33]INAYAT A, AHMED A, TARIQ R, et al. Techno economical evaluation of bio-oil production via biomass fast pyrolysis process: A review [J]. Frontiers in Energy

Research, 2022, 9: 770355.

- [34]RAVENDRAN R R, ABDULRAZIK A, ZAILAN R.Aspen Plus simulation of optimal biogas production in anaerobic digestion process IOP conference series [J]. Materials Science and Engineering, 2019, 702(1):012001.
- [35]PUTRA M A, TEH K C, TAN J, et al. Sustainability assessment of Indonesian cement manufacturing via integrated life cycle assessment and analytical hierarchy process method [J]. Environmental Science and Pollution Research, 2020(4):29352-29360.

553-565.

(本文责编:张帆)

收稿日期:2023-05-10;修回日期:2023-06-05 上网日期:2023-07-07;附录网址:www.iienergy.cn

#### 作者简介:

吴彤(1998),男,在读硕士研究生,从事可再生能源利用 经济性分析评价方面的研究,202134517@mail.sdu.edu.cn;

王守鑫(1993),男,工程师,从事可再生能源利用经济性 分析评价方面的工作,925653825@qq.com;

程星星\*(1984),女,教授,博士,从事大气污染物减排方面的研究,xcheng@sdu.edu.cn。

\*为通信作者。

# "面向'双碳'目标的综合能源系统优化规划与运行控制"专刊征稿启事

近年来,气候变化成为全球各国关注的焦点,我国提出了二氧化碳排放力争于2030年前达到峰值,努力争取2060年前实 现碳中和的"双碳"目标。未来能源系统的演化将向着节能减排、清洁高效的方向发展。低碳理念的渗透与各类低碳要素的引 入将使得综合能源呈现出明显的能碳耦合特性与全新的运行模式,并广泛地影响系统的规划、投资、调度与运行等功能环节。 因此,在传统综合能源系统学科研究体系基础上,从"碳视角"出发的综合能源系统低碳化研究将成为一个重要的研究发展 方向。

为此,《综合智慧能源》特推出"面向双碳目标的综合能源系统优化规划与运行控制"专刊,邀请浙江大学杨强教授、中国农业大学付学谦副教授、河海大学吴英俊副教授、杭州电子科技大学董伟副研究员担任特约主编,共同探讨"双碳"目标及"智慧综合能源系统"背景下清洁低碳能源电力系统的最新研究进展、理论成果、技术应用及相关标准,促进新一代低碳智慧综合能源系统研究的深入和技术的进步,为我国能源系统的低碳发展提供有益的借鉴与启示,欢迎业内同仁踊跃投稿!

#### 一、征稿范围(包括但不限于)

(1)综合能源系统优化规划与运行控制方法综述;(2)综合能源系统低碳规划与时序建设研究;(3)综合能源系统多时间尺 度低碳运行调度研究;(4)多方综合能源系统碳交易机制与应用;(5)计及需求响应的综合能源系统低碳运行调度;(6)提高供 能可靠性的综合能源系统鲁棒优化调控;(7)多投资主体视角下综合能源系统容量优化配置研究;(8)考虑碳捕集的综合能源 系统经济运行研究;(9)考虑碳交易的多能耦合园区低碳规划;(10)基于博弈的多区域综合能源系统协同优化研究;(11)含 P2G的综合能源系统风电消纳研究;(12)电氢气多能协同的综合能源系统低碳经济调度研究;(13)区域综合能源系统仿真方 法及示范性应用。

## 二、时间进度

专刊拟于2023年11月30日截稿,2024年择期优先出版。

#### 三、征稿要求

(1)专刊只收录未公开发表的论文,拒绝一稿多投。作者对论文内容的真实性和客观性负责。

(2)按照《综合智慧能源》论文格式要求使用 Word 软件排版,请登录《综合智慧能源》在线采编系统(www.hdpower.net 或 www.iienergy.cn)下载中心下载论文模板。

(3)请保留论文图片、曲线和表格原始文件,并在投稿时按规定提交。

(4)论文作者应遵守相关学术不端规定。

#### 四、投稿方式

(1)在线投稿(推荐):登录在线采编系统(www.hdpower.net或www.iienergy.cn),完成在线全文投稿,欢迎投稿时推荐审稿人。

(2)邮箱投稿:qyang@zju.edu.cn(杨教授);hdjs-chd@vip.163.com(编辑部)。

(3) 咨询联系: 刘芳 0371-58501060, 13838002988; 杨满成 010-63918755, 13801175292。