

DOI: 10.13205/j.hjgc.202305025

廖成峰,刘雨晨,唐玉婷,等.藻类生物质气化制氨的生命周期评价和技术经济分析[J].环境工程,2023,41(5):187-194.

藻类生物质气化制氨的生命周期评价和技术经济分析

廖成峰 刘雨晨 唐玉婷* 唐杰洪 马晓茜

(华南理工大学 电力学院,广东省能源高效清洁利用重点实验室,广州 510640)

摘要: 生物质气化制氨是缓解能源紧张、实现可持续发展的重要途径之一。为探究藻类生物质气化制氨过程的环保性和经济性,采用生命周期评价(life cycle assessment, LCA)和技术经济分析方法,对超临界水气化、等离子体气化制氢、化学链空气分离和深冷空气分离制氮,以及 Haber-Bosch(H-B)工艺合成氨组合成的 4 种制氨工艺路线分别进行能源消耗、环境影响和经济性分析。结果表明:4 种制氨工艺路线中,超临界水气化制氢、深冷空气分离制氮和 H-B 工艺合成氨组合的工艺路线环境影响最小,其总环境影响负荷值为 36001.9 mPET₂₀₁₀(milli-person equivalent, 毫人当量)。虽然等离子体气化技术需对湿微藻进行干燥预处理,但其生产单吨液氨的成本仍低于超临界水气化技术。其中,等离子体气化制氢、化学链空气分离制氮和 H-B 工艺合成氨的工艺路线经济成本最低,其单吨液氨的成本为 5891.67 元。与传统制氨工艺相比,利用微藻气化制氨更具环保性,但仍需进一步改进设备,提高工艺的氨产量,降低制氨成本。

关键词: 生命周期评价;超临界水气化;等离子体气化;技术经济分析

LIFE CYCLE ASSESSMENT AND TECHNO-ECONOMIC ANALYSIS OF PRODUCING AMMONIA BY ALGAL BIOMASS GASIFICATION

LIAO Chengfeng, LIU Yuchen, TANG Yuting*, TANG Jiehong, MA Xiaoqian

(Guangdong Key Laboratory of Efficient and Clean Utilization of Energy, School of Electric Power, South China University of Technology, Guangzhou 510640, China)

Abstract: Producing ammonia by biomass gasification is one of the important ways to alleviate energy shortage and achieve sustainable development. In order to explore the environmental and economic performance of ammonia production by algal biomass gasification, this paper used life cycle assessment (LCA) and techno-economic analysis methods to analyze the energy consumption, environmental impacts and economic performance of four ammonia production routes, including supercritical water gasification and plasma gasification to produce hydrogen, chemical chain air separation and cryogenic air separation to produce nitrogen, and Haber-Bosch (H-B) process to produce ammonia. The results showed that in terms of the total environmental impacts, the best eco-friendly route was supercritical water gasification to produce hydrogen & deep-cooled air separation to produce nitrogen & H-B process to produce ammonia, of which the total environmental impacts potential was 36001.9 mPE. Although plasma gasification required pre-drying of the material, but the production cost of liquid ammonia per ton when adopting plasma gasification was lower than adopting supercritical water gasification. The most economic route was plasma gasification to produce hydrogen & chemical chain air separation to produce nitrogen & H-B process to produce ammonia, of which the production cost of liquid ammonia per ton was 5891.67 CNY. The process of microalgae gasification to produce ammonia was more eco-friendly than the traditional ammonia production processes, but it is still necessary to improve the equipment and technology to increase the ammonia yield and reduce the production cost.

Keywords: life cycle assessment; supercritical water gasification; plasma gasification; technical and economic analyses

收稿日期: 2022-09-15

基金项目: 国家重点研发计划子课题“节点型特大城市固废/危废产排的时空分布图谱、分类制度和回收模式”(2020YFC1908901)

第一作者: 廖成峰(1999-),女,硕士研究生,主要研究方向为氨能源的生命周期评价。1534144898@qq.com

* 通信作者: 唐玉婷(1987-),女,副教授,主要研究方向为固废资源化。eptangyt@scut.edu.com

0 引言

随着经济的迅速发展,能源短缺、燃料价格不稳定以及社会对温室效应的持续关注,化石燃料的利用带来了一系列问题,亟须开展替代燃料的相关研究。氢的单位质量能量密度大,在能源、化工和交通运输领域具有广阔的应用潜力,但氢能在商业应用中存在大规模的氢储存难、运输成本高且安全性较低等问题。目前,国际上提出以氢为载体的氨氢能源体系用于解决储能问题。氨在常温下为无色有刺激性气味的气体,是富氢载体,所含氢元素的质量分数达到17.6%^[1],完全燃烧只产生氮气和水。此外,氨储存和运输便捷,合成过程简单,与传统的碳能源体系相比,氨氢能源体系清洁环保,可作为替代型燃料。当前,国内外学者针对以化石能源、可再生能源合成氨能源的各类技术路线,开展了广泛的能源-经济-环境(energy-economic-environment, 3E)性能研究。Ren等^[2]基于生命周期评价(life cycle assessment, LCA)方法分析了中国主流氨合成技术,即煤粉气流床气化技术的3E性能; Gonzalez-Diaz等^[3]评估了以氨形式运输的甲烷制氢技术与CO₂利用相结合的3E性能,发现制氢技术与碳捕获、利用与封存技术(carbon capture, utilization and storage, CCUS)在行业中具有良好的应用前景; Bicer等^[4]比较了将水电、核电、生物质能焚烧发电及城市生活垃圾焚烧发电作为能源输入以合成氨气的3E性能,结果表明:基于城市垃圾焚烧发电和水力发电的氨气生产技术对环境的影响低于其他技术; 刘桐利等^[5]以秸秆为例,建立了基于LCA与层次分析法的综合评价方法,用于比选生物质合成氨能源的最佳技术路线。

由于生物质光合作用对CO₂的固定决定了生物质气化过程不会造成温室气体的增加^[3],因此将生物质转化为氢能源被认为是当今最重要的绿色能源技术之一。其中,藻类生物质因其碳含量和能量密度较高、氧含量和水含量较低(疏水性)的特性,能有效地利用工业和城市废水中的营养物质,且其高生产率和光合效率也能有效地减少CO₂排放,被认为是一种非常有前途的制氨生物质来源。但是,现有研究鲜有涉及藻类生物质气化制氨的LCA和技术经济分析,并缺乏对不同藻类生物质制氨工艺路线的分析。为此,本研究以藻类生物质为原料,针对超临界水气化/等离子体气化制氢,化学链空气分离/深冷空气分离制氮以及H-B工艺合成氨组合成的4种技术路

线,进行LCA和技术经济分析,旨在对藻类生物质气化合成氨气的新工艺进行综合评价,为氨能源的合成提供革新方向。

1 合成氨气工艺路线

合成氨气工艺路线主要由3部分组成:藻类生物质超临界水气化/等离子体气化制氢,化学链空气分离/深冷空气分离制氮,以及H-B工艺合成氨,4种工艺路线如表1所示。

表1 合成氨气的4种工艺路线

路线	研究对象
路线1	超临界水气化制氢+化学链空气分离制氮+H-B工艺合成氨
路线2	等离子体气化制氢+化学链空气分离制氮+H-B工艺合成氨
路线3	超临界水气化制氢+深冷空气分离制氮+H-B工艺合成氨
路线4	等离子体气化制氢+深冷空气分离制氮+H-B工艺合成氨

1.1 藻类的养殖

本文选用的藻类生物质为小球藻,其工业分析与元素分析如表2所示。

表2 小球藻的工业分析与元素分析

工业分析			元素分析				
挥发分	固定碳	灰分	碳	氢	氮	氧	硫
70.08	21.02	8.9	45.69	7.71	11.26	25.69	0.75

在藻类的大规模养殖系统中,主要有开放池塘系统和水平管式光生物反应器系统。相比于水平管式光生物反应器系统,开放池塘系统的温室气体密度和能量投入更低^[6]。Resurreccion等^[7]的经济性研究表明:开放池塘系统比光生物反应器更适合藻类生产完全替代燃料。所以,本研究选用开放池塘系统进行藻类的养殖,养殖直接土地使用面积为0.04 ha^[7]。

1.2 气化制氢气

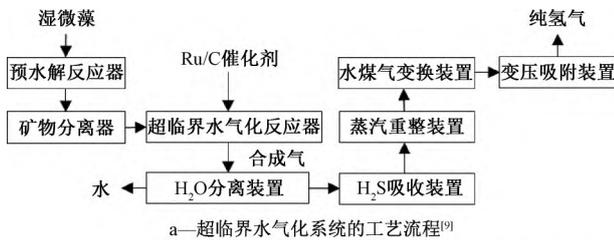
1.2.1 超临界水气化技术

超临界水具有良好的物理化学特性,被用作反应物和反应介质。与传统的制氢技术相比,超临界水气化(supercritical water gasification, SCWG)制氢技术不需对原料进行干燥预处理,反应速率快,效率高^[8]。此外,SCWG的碳和焦油产量较低,在相对较低温度下,气体燃料质量比传统气化过程有明显改善^[9]。

在无催化剂的情况下,SCWG需在高温环境下进行,且水中的一些含杂原子化合物,特别是含氮化合物,较难去除。因此,为降低气化所需温度,提高气化效率,增加目标产物氢气含量,SCWG通常加入催化剂。Shan等^[9]研究了SCWG中分别负载在Al₂O₃、

MgO、CeO₂、TiO₂、ZrO₂ 和活性炭上 Ru 的催化作用。结果表明:与其他催化剂相比,负载在活性炭上的 Ru 催化剂(Ru/C)具有最高的金属分散性,在降低总有机碳、增加碳气化效率和提高氢气产率方面表现出最佳性能。因此,本研究路线 1 和 3 都选择添加 Ru/C 的 SCWG 技术,以便湿微藻 SCWG 生产富含氢气的合成气。

SCWG 系统的简化流程如图 1a 所示。湿微藻加压通过预水解反应器进行矿物分离,以去除盐分,预防下游堵塞。随后,在 Ru/C 催化剂的作用下进行 SCWG,合成气依次经过 H₂O 分离装置、H₂S 吸收装置、蒸汽重整装置以及水煤气变换装置后,进入变压吸附装置进行氢气提纯。变压吸附提纯技术通常采用再生固体吸附剂的原理^[10],在高压环境温度下从其余气体混合物成分中选择氢气,以生产高浓度氢气^[11]。



a—超临界水气化系统的工艺流程^[9]



b—等离子体气化系统的工艺流程

图 1 微藻气化制氢的工艺流程

Figure 1 Process flow diagram of algal biomass gasification to hydrogen

1.2.2 等离子体气化技术

等离子体不同于固体、液体和气体,是一种由电子、离子和未电离的中性粒子组成的混合物^[12]。与常规气化相比,等离子体气化有利于强化与高温等离子体的焦油裂解反应,促进焦油的完全破坏,尤其是重质焦油化合物。等离子体自身的化学性质以及热加工过程中的高温环境,促进了合成气产生,同时也完全控制了燃烧过程中有害物质的排放,如二噁英和呋喃等^[13]。

蒸汽等离子体气化系统的简化工艺流程如图 1b 所示,主要分为 2 个子系统:气化制氢系统与分离-提纯子系统^[14]。在原料进入等离子体气化炉之前,需对湿微藻进行干燥,干燥后的微藻进入等离子体气

化炉进行气化,气化后的合成气在水煤气变换和变压吸附的作用下提纯得到高浓度氢气。

1.3 空气分离制氮气

1.3.1 化学链空气分离技术

化学链空气分离技术是一种基于金属氧化物颗粒循环氧化和还原,将氧气和氮气从空气中分离出的方法,其工作原理如图 2 所示。氧化反应器和还原反应器通过回路密封连接在一起,以防止气体从一个反应器泄漏到另一个反应器。在氧化反应器中,还原态载氧体(Me_xO_{y-2})会被入口空气氧化至较高的氧化态(Me_xO_y)。在还原反应器中,完全氧化态载氧体(Me_xO_y)在高温下释放氧气。

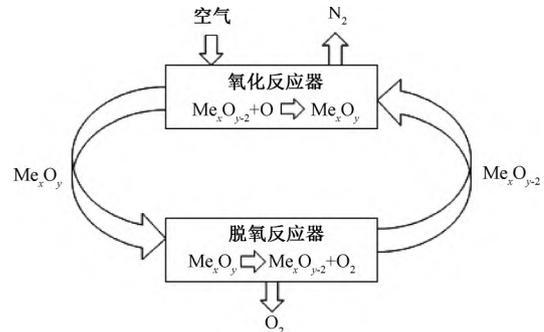


图 2 化学链空气分离技术的工作原理^[16]

Figure 2 Working principle of chemical chain air separation technology^[16]

对于载氧体,Shah 等^[15]研究了 20 种不同氧化态的金属,指出 Mn、Co 和 Cu 最有潜力,其中, Mn_2O_3/Mn_3O_4 在温和条件下表现出高反应速率。当氧化和还原温度分别约为 720、870 °C 时, Mn_2O_3/Mn_3O_4 的转化率高达 80%~95%^[16]。因此,路线 1 和 2 选择 Mn_2O_3/Mn_3O_4 作为载氧体,转化率设为 90%。

1.3.2 深冷空气分离技术

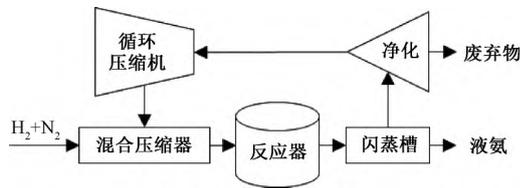
深冷空气分离技术是空气经压缩、冷却后液化,然后利用氧气、氮气沸点的差异(在标准大气压力下,氧气的沸点为 363 °C,氮气的沸点为 350 °C),在精馏塔中进行质热交换,氧气因沸点高不断凝聚成液体下流,氮气因沸点低不断蒸发成蒸气上升,从而达到氮氧分离的目的^[17]。

1.4 Haber-Bosch 工艺合成氨气

以生物质气化技术产生的氢气与空气分离技术提取的氮气作为原料气,通过 H-B 工艺合成氨气,未反应的氢气和氮气被回收到 H-B 工艺过程中,以提高氨的转化率,其工作原理如图 3 所示。

1.5 液氨的储存

液氨的储存方式比氢气更简单、规模更大、安全

图3 H-B工艺合成氨气的工作原理^[1]Figure 3 Working principle of ammonia synthesis in the H-B process^[1]

性更高。液氨储罐的体积较大,由于常压低温储存的投资成本低于常温加压储存,且低温储存能更好地控制温度,液氨在储存过程中更稳定,蒸发损失更低,储存时间更久^[1]。所以本研究H-B工艺合成的液氨采用常压低温储罐储存,储存量设计为9000 t^[18]。

2 生命周期评价

LCA的实施需要满足一定的框架结构和步骤,大致可分为4步:目标和范围定义、清单分析、影响评估与结果释义。

2.1 系统边界和功能单位

图4显示了4种制氨工艺路线的系统边界,包括微藻的培养、收获、运输和干燥,超临界水气化/等离子体气化制氢,化学链空气分离/深冷空气分离制氮,H-B工艺合成氨以及液氨的储存。

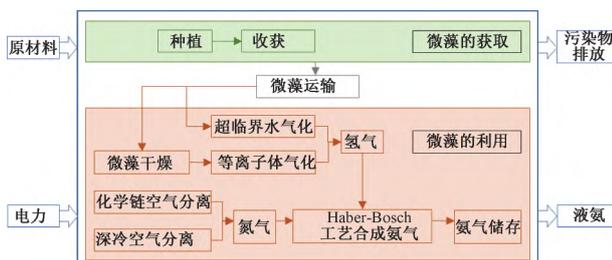


图4 微藻气化制氨的生命周期评价系统边界

Figure 4 Life cycle evaluation system boundary for ammonia production

by algal biomass gasification

由于整个系统的设计运行寿命长达24年,与整个运行过程相比,制氨厂初始建设、安装阶段的环境影响几乎可忽略。因此,LCA系统边界剔除了厂房的建设、设备的制造和安装,环境影响计算不包括建设材料的生产和基础设施建设过程中的温室气体排放和能源消耗^[18]。LCA的功能单位选为1 t液氨。

2.2 生命周期清单分析

假设微藻养殖厂与制氨厂距离较近,用8 t的中大型柴油卡车进行运输,运输距离设定为10 km^[19],运输1 t微藻消耗柴油0.02 kg/km^[20]。每生产1 t NH₃的LCA清单如表3所示。输入主要包括能源与材料

试剂,输出主要包括CO、NO_x、SO₂等气态污染物,COD等水溶性污染物及PM₁₀等固态污染物。

2.3 生命周期的环境影响负荷

LCA清单可反映各种输入和输出的相对值大小,但由于各种排放因子对生态系统和环境变化的贡献不同,所以需将清单分析的结果转化为既容易理解、又能反映环境影响负荷的指标。本研究采用国际通用的ISO 14040标准的特征化因子^[26],选取2010年全球污染物排放总量进行数据标准化^[27-28]。5类环境影响类型的标准化基准值和权重因子见表4。

3 技术经济分析

为表示出4种工艺路线的经济效益,技术经济分析采用工厂的投资成本和生产成本确定产品成本。在此分析中,假设设备寿命为24年^[29],基准年为2020年。

3.1 总投资成本

总投资成本(total investment costs, TIC)包含固定投资成本(fixed investment costs, FIC)和运营成本。其中,FIC由设备成本(total equipment costs, TEC)、直接成本和间接成本组成,而运营成本是经营中可供使用和周转的净资本。直接成本包括安装、仪表和控制、管道、电气系统、建筑和服务等环节的费用,间接成本则包括工程和监督、法律费用、承包商费用、应急费用等。直接成本和间接成本主要根据TEC的百分比计算^[30],如表5所示。

3.2 总生产成本

总生产成本用于评估生产过程中的总费用,包括固定成本和可变成本,其中,可变成本为工艺运行所需的原材料成本。以设备寿命24年、残值率4%为条件^[31],采用直线法计算折旧成本。总生产成本中固定成本各组成部分的比例参考文献^[30],如表6所示。

4 结果与讨论

4.1 生命周期能源消耗

由表3可知:路线1—4的生命周期能耗分别为25.72、27.96、25.39、27.63 GJ。H-B工艺合成氨环节在4种工艺路线中的能耗占比均最大。制氢工艺中,等离子体气化制氢技术的能耗要高于超临界水气化制氢技术,这是因为等离子体气化制氢技术需要对湿微藻进行预干燥处理。制氮工艺中,深冷空气分离制氮技术的能耗小于化学链空气分离制氮技术,但由于制氮工艺能耗占总能耗比例较低,所以选择不同的制氮技术对总能耗影响不大。

表 3 生产 1 t 液氨的生命周期总清单

Table 3 Total emission list of life cycle of 1 ton of liquid ammonia

kg

参量	主要环节	物质名称	单位	路线 1	路线 2	路线 3	路线 4	来源	
输入	能源	海藻养殖	MJ	5155.12	3526.21	5155.12	3526.21	[14]	
		气化制氢气	MJ	1175.69	5044.9	1175.69	5044.9	[9,14,21]	
		空气分离制氮气	MJ	791.67	791.67	457.24	457.24	[17][22]	
		合成氨气和液氨储存	MJ	18600	18600	18600	18600	[23]	
	材料试剂	海藻养殖	CO ₂	kg	5624.41	3847.22	5624.41	3847.22	[14]
			H ₂ O	kg	980.31	670.56	980.31	670.56	[24]
			NH ₃	kg	0.39	0.27	0.39	0.27	[24]
			(NH ₄) ₂ HPO ₄	kg	0.04	0.02	0.04	0.02	[24]
		海藻运输	柴油	kg	0.79	0.54	0.79	0.54	[19]
			气化制氢气	湿海藻	kg	3937.01	2693	357.14	2693
输出	污染物	去离子水	kg	7874.02	—	9435.88	—	[9]	
		Ru/C	kg	118.11	—	30.19	—	[25]	
		空气分离制氮气	Mn ₃ O ₄	kg	230.21	230.21	—	—	[16]
		冷却水	kg	—	—	361.87	361.87	[17]	
		合成氨气和液氨储存	Fe ₂ O ₃	kg	0.001	0.001	0.001	0.001	[23]
		CO	kg	243.06	2645.17	150.54	2645.17	[14,16,17,19,23,25]	
		CO ₂	kg	3231.087	-2214.41	348.44	-2098.35		
		CH ₄	kg	6512.31	2.74	4107.64	2.74		
		C ₂ H ₆	kg	822.05	—	2057.14	—		
		C ₃ H ₈	kg	10.24	—	371.43	—		
产品	产品	SO ₂	kg	0.17	0.12	0.17	0.12		
		N ₂ O	kg	0.01	0.01	0.01	0.01		
		NO _x	kg	0.54	0.37	0.54	0.37		
		HCN	kg	—	0.97	—	0.97		
		COD	kg	0.28	0.19	0.28	0.19		
		HC	kg	0.29	0.20	0.29	0.20		
		PM ₁₀	kg	0.06	0.04	0.06	0.04		
		H ₂ S	kg	—	19.39	—	19.39		
		COS	kg	—	0.97	—	0.97		
		NH ₃	kg	1000	1000	1000	1000		

表 4 5 类环境影响类型的标准化值和权重因子^[28]

Table 4 Standardized values and weighting factors for 5 types of environmental impact^[28]

环境影响类型	标准化基准值	权重因子
GW	8700 kgCO _{2-eq} /(人·a)	0.83
AC	36 kg SO _{2-eq} /(人·a)	0.73
NE	61 kg PO _{4-eq} /(人·a)	0.73
PO	0.65 kg C ₂ H _{4-eq} /(人·a)	0.51
SA	18 kg/(人·a)	0.61

表 5 直接成本和间接成本各组成部分比例

Table 5 Assumption on proportions of direct cost and indirect cost

	组成部分	经济假设(of TEC)
直接成本	安装	14%
	仪表和控制	10%
	管道	7%
	电气系统	8%
	建筑和服务	16%
间接成本	工程和监督	7%
	法律费用	4%
	承包商费用	5%
	应急费用	10%
运营成本	净资本	10%

表 6 固定成本各组成部分比例

Table 6 Assumption for fixed operating cost calculation

组成部分	经济假设(of TIC)
运营与维护	2%
保险	1%
地方税	2%
特许权使用费	1%
运营劳动力	80000 元/(a×100 人)
管理	运营劳动力的 20%
监督	运营劳动力的 15%
运营费用	50%×(运营与维护+运营劳动力+监督)

刘婷婷^[32]研究了煤作为原料制氨的生命周期, 将其分为原料上游(包括原料开采、加工与运输环节)和氨气生产(包括制氢气、制氮气与合成氨气环节)2个环节。结果显示:煤制氨的生命周期能耗为 46.757 GJ/t,原料上游与氨气生产的能耗占比分别为 71.80%与 28.20%。与煤制氨相比,微藻气化制氨生命周期能耗下降的主要原因在于原料上游能耗下降显著。虽然微藻的热值显著低于煤,导致其氨气

生产环节的能耗高于煤,但在原料上游环节,微藻气化制氨的生命周期能耗要低于煤制氨。此外,微藻作为生物质能,可再生性好,具有能缓解能源紧张的优势。

4.2 生命周期环境影响负荷评价

对表3生产1 t液氨的LCA清单进行标准化并加权,计算5类环境影响负荷值,如表7所示。

表7 标准化并加权后1 t液氨的环境影响负荷值

环境影响类型	路线1	路线2	路线3	路线4
GW	15903.2	311.16	9875.27	322.23
AC	11.11	746.78	11.11	746.78
NE	9.41	6.44	9.41	6.44
PO	41488.92	62278.15	26103.97	62278.15
SA	2.13	1.46	2.13	1.46
总计	57414.78	63343.97	36001.90	63355.05

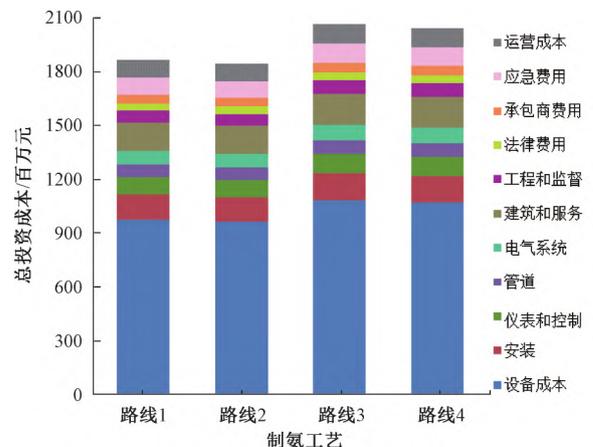
注:单位为 mPET, milli-person equivalent, 毫人当量。

由表7可知:4种工艺路线的加权总环境影响负荷值分别为57414.78,63343.97,36001.9,63355.05 mPET₂₀₁₀。其中,采用超临界水气化技术的工艺路线环境影响显著小于采用等离子体气化技术的工艺路线,尤以路线3的环境影响最小。在LCA分析的5种环境影响类型中,环境影响负荷值较大的类型主要为PO、GW和AC。PO与GW的显著高位与CO、CO₂、CH₄、C₂H₆和C₃H₈的大量排放有关。Gonzalez-Diaz等^[3]在Aspen plus软件模拟氨合成过程中同样也发现了上述气体的显著排放。为进一步优化环保性能,一方面对于CO₂,可以探索CCUS与微藻气化制氨技术联用,将捕集的CO₂用于微藻养殖或化工产品生产;另一方面对于可燃气体副产物,应探索捕集、提纯、利用的技术链条,提高能源使用效率。近年来,已有研究证明微藻同步固定CO₂及净化污水具有一定的可行性^[33,34]。因此,对于电厂、污水处理厂等存在大量废水、污水净化需求的工业企业可与微藻养殖相结合,不仅能有效地利用废水、污水中的营养物质,而且能提高微藻制氨的环境效益。

4.3 技术经济分析

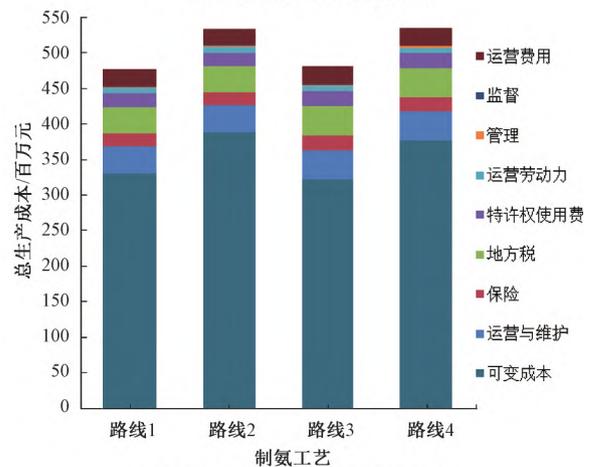
假设湿微藻处理量为30 t/h,电价为0.65元/kW·h,水价为3元/t^[31],微藻气化制氨工艺的总投资成本如图5a所示。路线1—4制氨工艺的总投资成本分别为1.866×10⁹,1.845×10⁹,2.065×10⁹,2.044×10⁹元。对于同样规模的气化炉(进料量为30 t/h),采用深冷空气分离技术的投资成本约是化学链空气

分离技术投资成本的1.1倍。这是由于深冷空气分离制氨的设备体积更大,对设备要求更高。



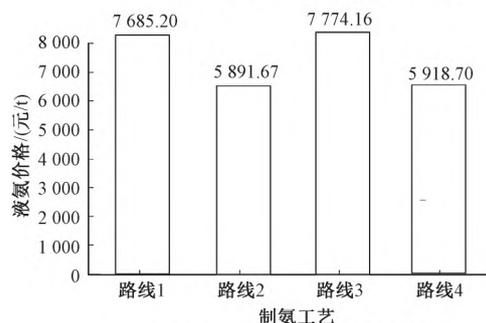
制氨工艺

a—藻类气化制氨工艺总投资成本



制氨工艺

b—藻类气化制氨工艺的总生产成本



制氨工艺

c—藻类气化制氨工艺的经济性比较

图5 藻类气化制氨工艺的技术经济性分析

Figure 5 Techno-economic analysis results of ammonia production by algae gasification

路线1—4制氨工艺的总生产成本分别为4.77×10⁸,5.34×10⁸,4.82×10⁸,5.35×10⁸元。由此可见,SCWG制氨的总生产成本低于等离子体气化制氨。由图5b可知:可变成本在总生产成本中占比较高。等离子体气化制氨技术气化前需对湿微藻进行干燥,耗电量大,其可变成本比SCWG制氨过程高。

Lin 等^[35]将水电解的氢气和变压吸附的氮气作为原料,发现 H-B 工艺生产液氨的成本约为 1600 美元/t(约合 10880 元/t),而中国报告大厅公布的最新数据显示液氨价格为 4800 元/t^[36]。由图 5c 可看出:路线一、路线二、路线三和路线四的单吨液氨生产成本分别为 7685.20,5891.67,7774.16,5918.70 元。其中,路线 1 的经济成本最高,路线 2 的经济成本最低,且 4 种制氨工艺路线的液氨成本与传统工艺制氨成本在同一数量级,结果具有可行性。等离子体气化制氨工艺的单吨液氨总成本低于 SCWG,这是因为 SCWG 制氨的原料消耗更大,在制备等量的液氨时,等离子体气化的单吨液氨价格更低。与市面上液氨的销售价格相比,目前利用微藻气化制氨的成本较高,需进一步改进气化设备降低成本。

5 结论

藻类生物质气化制氨技术因其具有高效、低污染等特点而备受关注。在本研究中,对 4 种新兴制氨工艺路线进行了生命周期评价和技术经济性分析,结论如下:

1) 路线 1—4 的生命周期能耗分别为 25.72, 27.96, 25.39, 27.63 GJ/t, 4 种路线的生命周期能耗均低于煤制氨的技术路线。在微藻气化制氨的生命周期中,以 H-B 工艺合成氨气环节为能耗控制的主要环节。

2) 路线 1—4 的生命周期加权总环境影响负荷值分别为 57414.78, 63343.97, 36001.9, 63355.05 mPET₂₀₁₀, 其中,主要的环境影响类型为 PO、GW、AC。为控制这 2 类环境影响,建议发展微藻气化制氨联用 CCUS,微藻养殖同步 CO₂ 固定与废水处理等技术。

3) 路线 1—4 的液氨生产成本分别为 7685.20, 5891.67, 7774.16, 5918.70 元/t。其中,采用等离子体气化制氨与化学链空气分离制氨生产单吨液氨的成本最低,但是其环境影响负荷较大。因此,对于以微藻气化制氨成本为主要目标的行业,可采用路线 2;以绿色清洁制氨为主要目标的行业,可采用路线 3。

4) 4 种微藻气化制氨工艺的单吨制氨成本较高,主要原因为微藻养殖成本高、气化设备成本高以及产量不高。在后续的研究中需要改进气化设备,提高处理规模和制氨产量,同时降低设备的投资成本,以此提高微藻气化制氨的效益。

参考文献

[1] 王月姑. 以氨为燃料和载氢介质的生命周期能效和环境效益

分析[D]. 厦门: 厦门大学, 2019.

- [2] REN K, ZHANG T Z, TAN X F, et al. Life cycle assessment of ammonia synthesis based on pulverized coal entrained flow gasification technology in China[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2021, 328: 129658.
- [3] GONZALEZ-DIAZ A, JIANG LGONZALEZ-DIAZ M O, et al. Hydrogen production via ammonia from methane integrated with enhanced oil recovery: a techno-economic analysis[J]. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 2021, 9(2): 105050.
- [4] BICER Y, DINCER I, ZAMFIRESCU C, et al. Comparative life cycle assessment of various ammonia production methods[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2016, 135: 1379-1395.
- [5] 刘桐利, 赵立欣, 孟海波, 等. 秸秆能源化利用技术评价方法探究与优化[J]. *环境工程*, 2020, 38(8): 195-200.
- [6] CARNEIRO M L N M, PRADELLE F, BRAGA S L, et al. Potential of biofuels from algae: comparison with fossil fuels, ethanol and biodiesel in Europe and Brazil through life cycle assessment (LCA) [J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2017, 73: 632-653.
- [7] RESURRECCION E P, COLOSI L M, WHITE M A, et al. Comparison of algae cultivation methods for bioenergy production using a combined life cycle assessment and life cycle costing approach[J]. *Bioresource Technology*, 2012, 126: 298-306.
- [8] HU Y L, QI L Y, TIRUMALA VENKATESWARA RAO K, et al. Supercritical water gasification of biocrude oil from low-temperature liquefaction of algal lipid extraction residue[J]. *Fuel*, 2020, 276: 118017.
- [9] SHAN Y Q, YIN L X, DJANDJA O S, et al. Supercritical water gasification of waste water produced from hydrothermal liquefaction of microalgae over Ru catalyst for production of H₂ rich gas fuel[J]. *Fuel*, 2021, 292: 120288.
- [10] KUMAR M, OYEDUN A O, KUMAR A. A comparative analysis of hydrogen production from the thermochemical conversion of algal biomass[J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2019, 44(21): 10384-10397.
- [11] MAGDELDIN M, KOHL T, JÄRVINEN M. Process modeling, synthesis and thermodynamic evaluation of hydrogen production from hydrothermal processing of lipid extracted algae integrated with a downstream reformer conceptual plant[J]. *Biofuels*, 2016, 7(2): 97-116.
- [12] 麦伟仪, 杨东超, 杜海, 等. 城市生活垃圾等离子体气化发电 CDM 项目经济性分析[J]. *现代化工*, 2017, 37(6): 8-14.
- [13] RAMOS A, ROUBOA A. Life cycle thinking of plasma gasification as a waste-to-energy tool: review on environmental, economic and social aspects[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2022, 153: 111762.
- [14] KUO P C, ILLATHUKANDY B, WU W, et al. Energy, exergy, and environmental analyses of renewable hydrogen production through plasma gasification of microalgal biomass[J]. *Energy*, 2021, 223: 120025.
- [15] SHAH K, MOGHTADERI B, WALL T. Selection of suitable oxygen carriers for chemical looping air separation: a

- thermodynamic approach [J]. *Energy & Fuels*, 2012, 26(4): 2038-2045.
- [16] LV L P, ZHANG Z, LI H. SNG-electricity cogeneration through MSW gasification integrated with a dual chemical looping process [J]. *Chemical Engineering and Processing-Process Intensification*, 2019, 145: 107665.
- [17] 朱飞. 深冷法高纯氮工艺在镀锌钢带行业中的节能改造应用[J]. *能源与节能*, 2021(11): 57-59.
- [18] NOSHERWANI S A, NETO R C. Techno-economic assessment of commercial ammonia synthesis methods in coastal areas of Germany [J]. *Journal of Energy Storage*, 2021, 34: 102201.
- [19] LIU S K, YANG Y, YU L J, et al. Thermodynamic and environmental analysis of solar-driven supercritical water gasification of algae for ammonia synthesis and power production [J]. *Energy Conversion and Management*, 2021, 243: 114409.
- [20] 李巧. 基于焓理论的生物质分级气化制氢系统的综合性能评价[D]. 南京: 东南大学, 2019.
- [21] CHEN J W, XU W W, ZUO H Y, et al. System development and environmental performance analysis of a solar-driven supercritical water gasification pilot plant for hydrogen production using life cycle assessment approach [J]. *Energy Conversion and Management*, 2019, 184: 60-73.
- [22] WANG X D, SHAO Y L, JIN B S. Thermodynamic evaluation and modelling of an auto-thermal hybrid system of chemical looping combustion and air separation for power generation coupling with CO₂ cycles [J]. *Energy*, 2021, 236: 121431.
- [23] SMITH C, HILL A K, TORRENTE-MURCIANO L. Current and future role of Haber-Bosch ammonia in a carbon-free energy landscape [J]. *Energy & Environmental Science*, 2020, 13(2): 331-334.
- [24] SHI R, HANDLER R M, SHONNARD D R. Life cycle assessment of novel technologies for algae harvesting and oil extraction in the renewable diesel pathway [J]. *Algal Research*, 2019, 37: 248-259.
- [25] DUAN P, LI S, JIAO J, et al. Supercritical water gasification of microalgae over a two-component catalyst mixture [J]. *Science of the Total Environment*, 2018, 630: 243-253.
- [26] International Organization for Standardization. ISO 14040—1997 Environmental Management Life Cycle Assessment Principles and Framework [S]. Geneva; International Organization for Standardization, 1997.
- [27] 董进宁, 马晓茜. 基于生命周期评价的市政污泥烟气干化环境影响评价及其经济性分析[J]. *现代化工*, 2009, 29(4): 82-86.
- [28] TANG Y T, MA X Q, LAI Z Y, et al. Energy analysis and environmental impacts of a MSW oxy-fuel incineration power plant in China [J]. *Energy Policy*, 2013, 60: 132-141.
- [29] TRUSZKIEWICZ E, KOWALCZYK K, DEBSKA A, et al. Methanation of CO on Ru/graphitized-carbon catalysts: effects of the preparation method and the carbon support structure [J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2020, 45(56): 31985-31999.
- [30] KEIVANI B, GUNGOR A. Techno-economic assessment of coal and torrefied biomass co-combustion: a case study of oxy-combustion carbon capture power plants in Turkey [J]. *Journal of CO₂ Utilization*, 2022, 62: 102103.
- [31] SUN Y, QIN Z, TANG Y T, et al. Techno-environmental-economic evaluation on municipal solid waste (MSW) to power/fuel by gasification-based and incineration-based routes [J]. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 2021, 9(5): 106108.
- [32] 刘婷婷. 基于 LCA 的页岩气和传统能源制氨的环境影响比较研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2021.
- [33] 冯思然, 朱顺妮, 王忠铭. 微藻污水处理研究进展[J]. *环境工程*, 2019, 37(4): 57-62.
- [34] 孔佳, 沈伯雄, 孔文文, 等. 微藻在不同氮氮条件下固定 CO₂ 耦合净化废水实验[J]. *环境工程*, 2022, 40(5): 9-17.
- [35] LIN B S, WIESNER T, MALMALI M. Performance of a small-scale haber process: a techno-economic analysis [J]. *Sustainable Chemistry & Engineering*, 2020, 8(41): 15517-15531.
- [36] 2022年8月9日全国液氨价格最新行情预测 [EB/OL]. <https://www.chinabgao.com/jiage/996433.html>.

(上接第186页)

- [20] 丁庆章, 刘学勤, 张晓可. 水位波动对长江中下游湖泊湖滨带底质环境的影响[J]. *湖泊科学*, 2014, 26(3): 340-348.
- [21] 孙祥, 朱广伟, 笪文怡, 等. 天目湖沙河水库热分层变化及其对水质的影响[J]. *环境科学*, 2018, 39(6): 2632-2640.
- [22] 盛昱凤, 薛媛媛, 戚丽萍, 等. 1960年以来太湖水位变化特征及影响因素分析[J]. *北京师范大学学报(自然科学版)*, 2021, 57(1): 22-28.
- [23] KUNZ T J, DIEHL S. Phytoplankton, light and nutrients along a gradient of mixing depth: a field test of producer-resource theory [J]. *Freshwater Biology*, 2003, 48(6): 1050-1063.
- [24] 卢金锁, 李志龙. 热分层对水库水质的季节性影响: 以西安黑河水库为例[J]. *湖泊科学*, 2014, 26(5): 698-706.
- [25] MARTYNOVA M V. Time variations of the concentration of mobile forms of Fe, Mn, and P in silts of the Mozhaik Reservoir [J]. *Water Resources*, 2015, 42(5): 652-657.
- [26] 魏尧, 李一平, 朱雅, 等. 我国南方地区桉树叶浸泡对水库沉积物致黑元素分布及迁移转化的影响[J/OL]. *湖泊科学*: 1-12.
- [27] MUNGER Z W, CAYY C C, GERLING A B, et al. Effectiveness of hypolimnetic oxygenation for preventing accumulation of Fe and Mn in a drinking water reservoir [J]. *Water Research*, 2016, 106: 1-14.
- [28] 孙昊苏, 赵磊, 胡国金. 大宁调蓄水库低水位运行期水质保障措施[J]. *水资源开发与管理*, 2021(2): 3-6, 21.