

· 绿色低碳化工技术 ·

DOI: 10.12434/j.issn.2097-2547.20220318

## 基于 SimaPro 软件的煤制甲醇生命周期法环境影响评价

汪 雁<sup>1</sup>, 刘 云<sup>2</sup>, 陈 洁<sup>1</sup>, 张振东<sup>1</sup>, 丁绍兰<sup>2</sup>, 汪 平<sup>1</sup>

(1. 陕西省环境科学研究院, 陕西 西安 710061;  
2. 陕西科技大学 环境科学与工程学院, 陕西 西安 710021)

**摘要:** 煤制甲醇是清洁生产审核的重点行业之一。运用SimaPro软件, 对陕西某企业煤制甲醇项目(水煤浆法)中, 气化、甲醇、锅炉和空分等主要单元进行了生命周期评价。选取11个环境影响评价指标, 进行了特征化、损害评估、标准化、加权以及过程贡献的计算。从资源能源使用、污染物排放特征入手, 分析了环境影响与工艺过程之间的关系。结果表明, 在煤制甲醇的整个生命周期内, 气化单元对环境的综合影响占74.7%, 甲醇单元占24.7%, 其次为空分、锅炉单元。就单一指标, 气化单元对致癌物、呼吸道有机物、呼吸道无机物、辐射、臭氧层、生态毒性、酸化/富营养化、土地利用、矿物和化石燃料的影响均为最大; 甲醇单元对气候变化的影响最大。

**关键词:** 煤制甲醇; 环境影响; 生命周期评价; SimaPro软件; 清洁生产

中图分类号: TQ223; X82 文献标志码: A 文章编号: 2097-2547(2023)04-83-06

### Life cycle environmental impact assessment of coal-to-methanol based on SimaPro software

WANG Yan<sup>1</sup>, LIU Yun<sup>2</sup>, CHEN Jie<sup>1</sup>, ZHANG Zhendong<sup>1</sup>, DING Shaolan<sup>2</sup>, WANG Ping<sup>1</sup>

(1. Shaanxi Academy of Environmental Sciences, Xi'an 710061, Shaanxi, China; 2. School of Environmental Science and Engineering, Shaanxi University of Science and Technology, Xi'an 710021, Shaanxi, China)

**Abstract:** Coal-to-methanol is one of the key industries of cleaner production audit. Using SimaPro software, the life cycle assessment of main units such as gasification, methanol, boiler and air separation in the coal-to-methanol project (coal-water slurry process) of an enterprise in Shaanxi was carried out. Eleven indicators were selected for environmental impact assessment, and the calculation of characterization, damage assessment, standardization, weighting and process contribution was carried out. The correlation between environmental impact and unit process was analyzed from the characteristics of resource and energy use and pollutant emission. The results show that in the whole life cycle of coal-to-methanol, the comprehensive impact of gasification unit on the environment accounts for 74.7%, methanol unit accounts for 24.7%, followed by air separation unit and boiler unit. For a single indicator, the gasification unit has the largest impact on carcinogens, respiratory organic matter, respiratory inorganic matter, radiation, ozone layer, ecotoxicity, acidification/eutrophication, land use, minerals and fossil fuels, and the methanol unit has the largest impact on climate change.

**Keywords:** coal-to-methanol; environmental impact; life cycle assessment, SimaPro software; cleaner production

随着中国“碳中和”、“碳达峰”实施方案的推行, 低碳发展受到高度重视。煤化工作为国民经济的重要行业, 也是碳排放的主要源头。可持续发展下的绿色升级将引导产业结构和能源结构发生重大变化。煤制甲醇处于现代煤化工产业链的前端,

具有“两高”特征, 是实现绿色发展的重要环节, 也是煤炭清洁高效利用的主要环节之一<sup>[1]</sup>。清洁生产审核作为有效抓手, 可以助力企业实现节能、降耗、减污和增效等目标。而生命周期评价(LCA)方法可以量化工艺过程对环境的影响, 从资源能源使

收稿日期: 2022-10-11; 修回日期: 2022-12-13。

基金项目: 陕西省科学技术厅智慧环境保护关键技术研究开发与应用平台建设示范(2016KTZDSF-02-04)。

第一作者: 汪 雁(1978—), 本科, 高级工程师, 研究方向为清洁生产、环境标准和环境规划, E-mail: 8056938@qq.com。

通信作者: 丁绍兰(1963—), 博士, 教授, 博士生导师, 研究方向为清洁生产、污染防治和环境监测, E-mail: 420515858@qq.com。

用、污染物排放特征出发,分析环境影响与工艺过程的关系,是清洁生产审核方法的有益补充。

利用LCA方法可对物质能量利用和环境排放开展定量研究,评估由产品或生产活动引起的环境问题<sup>[2-5]</sup>,识别和量化减轻环境负荷的关键机会,并探讨改进环境的有效方法<sup>[6-8]</sup>。运用LCA方法还可以科学、系统、定量地制定煤炭行业的低碳发展战略。王桐<sup>[9]</sup>运用LCA方法分析了煤矿企业采煤和洗选的水足迹,量化煤炭省际贸易的虚拟水平,并通过情景分析量化煤炭行业的节水潜力。叶毓琛<sup>[10]</sup>采用全生命周期能源-经济-环境(3E)分析,结合模型对3种不同工艺路线的能源利用效率、二氧化碳排放、经济性进行了讨论,并对影响因素进行了灵敏度分析。孙元俊<sup>[11]</sup>以煤制甲醇生产工艺为研究对象,运用LCA方法的基本原理,对生产全过程进行了清单分析和环境影响识别,以此为依据初步建立了一套煤制甲醇行业清洁生产评价指标体系。可见LCA方法在煤炭行业中已得到应用,在节水潜力、工艺路线分析、清洁生产评价指标体系制定等方面取得了一定成果。但是,这些研究往往只是引用了生命周期的理念和框架,并未建立适用于中国的模型和数据库,没有利用软件做进一步的敏感性分析,这将是煤化工行业生命周期研究的重点。

本研究选择SimaPro软件(9.0.0.48版本),对煤制甲醇工艺单元开展环境影响分析,收集量化生命周期中的资源能源消耗和环境污染,识别环境影响环节及改善方向。SimaPro是容量最小、最普及的LCA软件,采用版本导入了最新的评价方法Eco-indicator 99。

## 1 煤制甲醇生命周期评价体系的确定

LCA方法的实施步骤主要包括目标和范围界定、清单分析(LCI)、影响评价(LCIA)和结果解释4个部分。本研究的背景数据来源于Ecoinvent3.0、USLCI和ELCD等数据库。选用SimaPro软件内嵌Eco-indicator 99的评价方法及理论模型进行分析。通过对产品生产流程的清单分析,可以发现主要影响类别包括致癌物、呼吸道有机物、呼吸道无机物、气候变化、辐射、臭氧层、生态毒性、酸化/富营养化、土地利用、矿物和化石燃料。

### 1.1 评价目标和范围界定

本研究的评价目标是对煤制甲醇主要工艺单元进行环境影响分析,收集、量化其生命周期中的资源能源消耗和环境污染情况,分析得出环境影响环节,判断进行改善的可能性与潜力,以推动企业实施清洁生产工艺。在中国,水煤浆气化技术被煤炭企业广泛使用。本研究选取第三代煤浆提浓水煤浆气化技术;气化原料选用榆树湾煤矿为主的配煤,是优质的液化用煤,锅炉燃料为榆树湾煤矿的烟煤;空分工艺包括分子筛空气净化、空气增压以及氧气、氮气内压缩;净化工艺采用低温甲醇洗。本研究LCA方法的系统边界为煤制甲醇从“摇篮”到“大门”的4个工艺单元,包括气化、甲醇、锅炉和空分,如图1所示。探讨工艺过程中产生的环境影响,生产中的固废一律按运出厂界处理,不计入评价范围。结合实际及文献<sup>[10-11,14]</sup>,选取功能单位为1t的煤制甲醇产品。

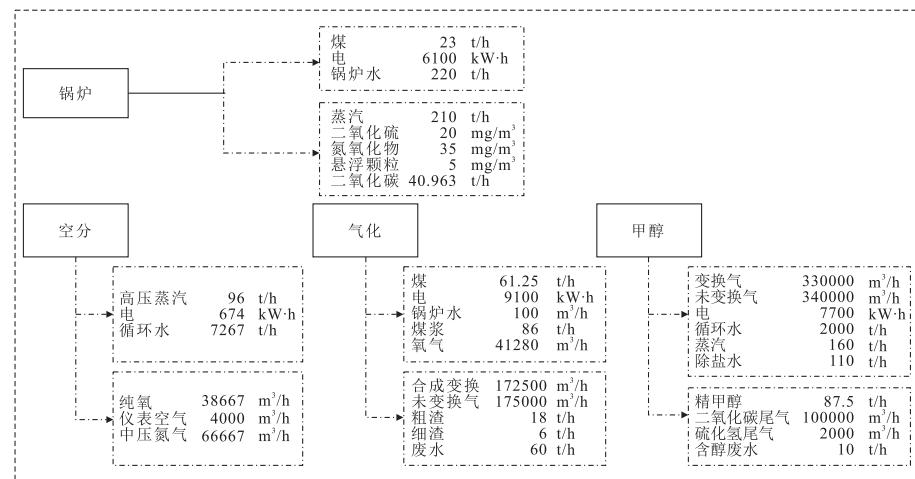


图1 煤制甲醇系统边界及LCI数据

Fig. 1 Coal-to-methanol system boundary and LCI data

## 1.2 清单分析

LCI是LCA方法中的关键环节,包含了对系统的输入与输出进行定量统计。ISO将LCI定义为“对产品、过程或活动在其整个生命周期内的所有输入和输出进行汇编和量化的过程”<sup>[15]</sup>。在确定的功能单元和系统边界内,对现场的实景数据、背景资料进行检验,根据生产流程,对各个单元资源和环境影响进行定量,作为后续影响评价的基础。LCI清单数据如图1所示,收集了陕西某企业煤制甲醇生产工艺中主要单元的原料、材料、能耗、排放等数据。其中,排放部分数据来自Ecoinvent 3.0、ELCD和USLCI等数据库。

## 1.3 影响评价

物质排放与资源获取在不同环境影响目录下可能存在较大差异,需通过特定方法,将其造成的总影响合理分配到对应的影响目录,并将影响值转换为特定评价单位使结果更加直观,这一过程称为特征化。特征化将特征化因子乘以每一种排放

物的量得到对应排放物的环境影响值<sup>[16-17]</sup>。根据Eco-indicator 99的特征化评价方法确定分类目录及单位<sup>[18]</sup>。为使评价结果更加直观,在特征化评价的基础上进行损害评估。此阶段,将特征化值与相应的转化因子相乘,并划分为人体健康、生态系统品质和资源消耗3类损害类型,单位分别为伤残调整寿命年(DALY)、物种减少量和资源开采额外成本(以美元计)。Eco-indicator 99的损害评估范围与转换因子见表1。

此外,还可以将损害评估结果按照该方法中提供的标准化因子进行统一,标准化结果的单位是无因次单位。此步骤中,必须将各项影响类别的损害评估结果再除以其相应损害种类的实际(或预期)影响强度。进一步对标准化结果进行加权处理,因不同人文视角对环境问题的观点不同,所确定的权重也会有所不同,以适应不同的情况和评价目标。本研究运用平等主义加权方法,对整体的环境影响进行定量计算<sup>[19]</sup>。

表1 损害评估结果

Table 1 Damage assessment results

损害类型	影响类别	转换因子	单位	损害评估结果			
				总和	锅炉单元	甲醇单元	空分单元
人体健康	致癌物	1	DALY	24.93674	2.18E-02	2.31E+01	5.01E-02
	呼吸道有机物	1					
	呼吸道无机物	1					
	气候变化	1					
	辐射	1					
	臭氧层	1					
生态系统品质	生态毒性	0.1	PAF*m <sup>2</sup> yr	223072	388.9908	399.6022	2314.685
	酸化/富营养化	1					
	土地利用	1					
资源消耗	矿物	1	MJ surplus	1036488	60208.44	6885.835	33371.47
	化石燃料	1					

## 2 生命周期评价结果与讨论

### 2.1 特征化影响评价结果

煤制甲醇生产工艺主要单元的特征化影响评价结果如表2和图2所示。图2中纵坐标代表各单元对影响类别的贡献率,正值代表对环境的损害影响,负值代表对环境的有益影响,相加后代表对环境的整体影响。根据结果,发现大部分损害影响来自气化单元,占总损害影响的74.7%;损害影响类别集中在致癌物、呼吸道有机物、呼吸道无机物、辐射、臭氧层、生态毒性、酸化/富营养化、土地利用、矿物和化石燃料,分别占其中的96.1%、89.4%、

93.4%、99.5%、83.3%、98.5%、93.7%、99.6%、97.7%和89.9%。这归因于气化过程消耗了大量的原料煤与O<sub>2</sub>反应,生成CO、H<sub>2</sub>和CO<sub>2</sub>。由于煤炭中含有氮、硫等,在高温条件下,会产生H<sub>2</sub>S、NH<sub>3</sub>及其他硫化物,NH<sub>3</sub>易溶于水,导致污水NH<sub>3</sub>含量高;而煤中的微粒导致污水变黑,有机物质又会导致化学需氧量浓度过高。甲醇单元对气候变化类别的影响较为显著。甲醇生产中,原料气杂质被去除,纯净的CO、H<sub>2</sub>和CO<sub>2</sub>气体用于合成。该单元要求大量使用压缩机,造成蒸汽、电能消耗。其余单元对环境也有一定损害影响,源于生产过程中消耗的原煤、电能和水。

表 2 特征化结果

Table 2 Characterization results

影响类别	特征化结果				
	总和	锅炉单元	甲醇单元	空分单元	气化单元
致癌物 /DALY	0.494471	0.001372	0.002329	0.015598	0.475171
呼吸道有机物 /DALY	0.001259	9.85E-05	1.60E-06	3.30E-05	0.001126
呼吸道无机物 /DALY	0.872791	0.017531	0.010243	0.030014	0.815003
气候变化 /DALY	23.55826	0.002827	23.1231	0.004436	0.427891
辐射 /DALY	0.009877	3.47E-07	8.35E-07	4.85E-05	0.009827
臭氧层 /DALY	8.16E-05	2.99E-08	1.19E-07	1.35E-05	6.79E-05
生态毒性 /PAF*m <sup>2</sup> yr	1095930	690.9532	1098.605	14731.88	1079409
酸化/富营养化 /PAF*m <sup>2</sup> yr	16315.75	297.8166	204.5509	518.1748	15295.21
土地利用 /PAF*m <sup>2</sup> yr	97163.23	22.07888	85.19085	323.3224	96732.64
矿物 /MJ surplus	52620.76	11.1497	20.33852	1176.401	51412.87
化石燃料 /MJ surplus	983867.2	60197.29	6865.497	32195.07	884609.4

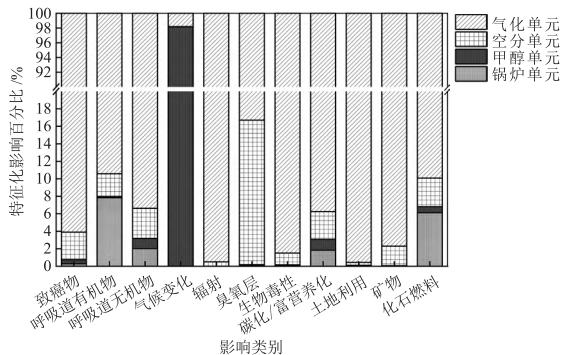


图 2 特征化的环境影响

Fig. 2 Characterized environmental impact

## 2.2 标准化与加权结果

标准化步骤用于表示影响类别对整体环境问题的贡献程度，单个标准值是由同一参考系统及时期（通常为一年）决定的，资源消耗及污染排放的总量是无因次的结果。当污染、能耗的信息被转换为相关的环境影响时，会得到一组数字，如温室效应潜能、臭氧层破坏潜能或酸雨潜能，通过加权，可以判断哪种比较重要。采用Eco-indicator 99 的标准化因子将特征化结果进行标准化处理，结果见表 3 及图 3，加权结果见表 4 与图 4。

表 3 标准化结果

Table 3 Normalization results

损害类型	标准化因子	标准化结果				
		总和	锅炉单元	甲醇单元	空分单元	气化单元
人体健康	65.1	2822.839	2.47E+00	2.62E+03	5.68E+00	195.7326
生态系统品质	1.95E-04	38.99299	0.067996	0.06985	0.404607	38.45053
资源消耗	1.19E-04	185.3241	10.76527	1.231187	5.966818	167.3608

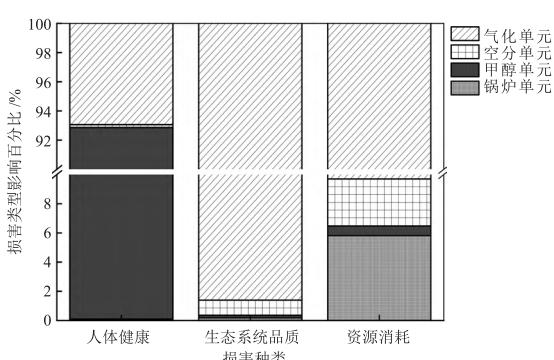


图 3 标准化的环境影响

Fig. 3 Normalized environmental impact

由图 3 可见，甲醇单元占人体健康影响的 92.8%，气化单元占 6.9%；气化单元占生态系统品质影响的 98.6%，占资源消耗影响的 90.3%。由图 4 可见，总影响主要集中在人体健康，而生态系统品质与资源消耗影响相差不大。主要归因于甲醇单元产生的蒸汽、电耗影响了气候变化，而气候变化通过损害评估归结到人体健康影响。气化单元的损害影响类别较多，通过损害评估，其中致癌物、呼吸道有机物、呼吸道无机物、辐射、臭氧层归结到人体健康影响；生态毒性、酸化/富营养化、土地利用归结到生态系统品质影响；矿物、化石燃料归结到资源消耗影响。

表 4 加权结果  
Table 4 Weighting results

损害类型	单位	加权结果			
		总和	锅炉单元	甲醇单元	空分单元
人体健康	MPt	903.4129	2.928342	785.9688	3.098526
生态系统品质	MPt	846.8516	0.741291	785.6877	1.702859
资源消耗	MPt	19.49649	3.40E-02	3.49E-02	2.02E-01

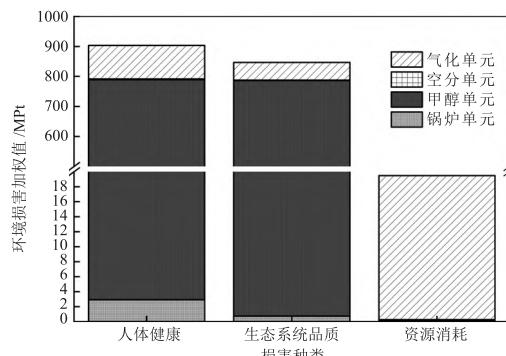


图 4 加权的环境影响

Fig. 4 Weighted environmental impact

由于本工艺的环境损害主要集中在气化单元和甲醇单元,而其中的主要影响来源为气化单元消耗的煤炭与甲醇单元消耗的蒸汽与电能;故应优先考虑减少气化过程中煤炭使用量,提高水煤浆浓度增加煤炭利用率,加强空气污染物排放控制,管理能源消耗,减少甲醇单元的蒸汽损耗与用电量。此外,大量废渣造成土地占用、资源浪费,影响生态环境,应尽可能减少废渣的产生与堆积,对废渣进行合理利用。

### 2.3 桑基图分析

通过SimaPro软件得到生命周期评价结果桑基图,如图 5 所示。

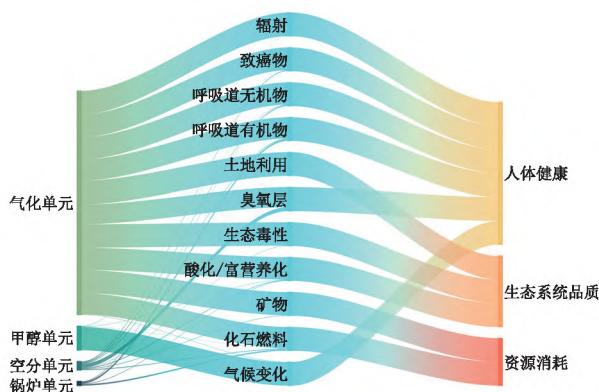


图 5 煤制甲醇项目生命周期评价结果的桑基图

Fig. 5 Sankey diagram of life cycle assessment results in coal-to-methanol project

图 5 展示了各个单元在总影响中的流向与贡献值。由图 5 可见,影响贡献由大到小为气化单元、甲醇单元、空分单元和锅炉单元,占比分别为 74.7%、24.7%、0.453% 和 0.0778%,这与之前的分析结果一致。对各个单元环境过程贡献进行分析得到图 6。由图 6 可见,在锅炉单元中,烟煤对于环境的影响最大,其次是电耗和冶金焦炭;在气化单元中,氧气消耗对环境的影响达到 79.7%,其次是烟煤和未变换气;在空分单元中,水的大量使用对环境的影响达到 97.8%,其次是电耗;在甲醇单元中,甲醇生产输出占环境影响最大,包括纯 CO、CO<sub>2</sub> 尾气、H<sub>2</sub>S 尾气、挥发性有机物和含醇废水,其次是蒸汽消耗。

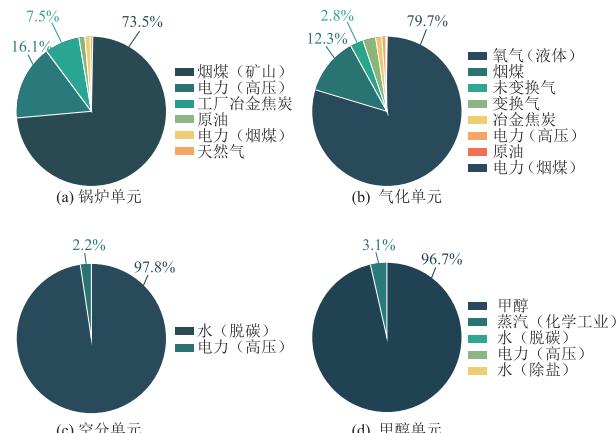


图 6 各单元的环境贡献

Fig. 6 Contribution of each unit on environment

### 3 结论

本文基于LCA理论,运用SimaPro软件对煤制甲醇工艺中的气化、甲醇、锅炉、空分单元进行了生命周期评价;选用Eco-indicator 99 的评价方法及理论模型进行分析,主要影响类别包括 11 个指标;对清单分析数据进行了特征化、损害评估、标准化、加权以及单元过程贡献的计算。主要结论如下。

(1) 整个工艺中气化单元对环境的损害最大、影响范围最广,损害影响类别集中在致癌物、呼吸道有机物、呼吸道无机物、辐射、臭氧层、生态毒性、

酸化/富营养化、土地利用、矿物、化石燃料。甲醇单元对气候变化类别的影响较为显著。

(2) 人体健康影响中, 甲醇单元占比 92.8%, 气化单元占比 6.9%; 生态系统品质影响中, 气化单元占比 98.6%; 资源消耗影响中, 气化单元占比 90.3%。本工艺造成的环境损害主要集中在气化单元和甲醇单元, 主要影响来源于气化单元消耗的煤炭与甲醇单元消耗的蒸汽与电能。

(3) 在煤制甲醇的整个生命周期内, 对环境综合影响从大到小依次为气化、甲醇、空分、锅炉单元, 占比分别为 74.7%、24.7%、0.453%、0.0778%。

煤制甲醇项目具有“两高”特征, 水煤浆气化法工艺的绿色升级应重点把握原料煤监控管理、水煤浆品质管控、工艺过程控制、全过程能源管控和二氧化碳综合利用。

## 参考文献

- [1] 岳宗欣. 煤制甲醇工艺现状及发展趋势[J]. 化工设计通讯, 2018, 44(11): 21.
- [2] 邓南圣, 王小兵. 生命周期评价[M]. 北京: 化学工业出版社, 2003, 23-27.
- [3] Environmental management-life cycle assessment-principles and framework: ISO 14040: 2006 [S].
- [4] BAJDUR W M, HENCLIK A, SKOWRON-GRABOWSKA B, et al. LCA application in the assessment of new technologies of industrial effluents treatment [J]. Desalin Water Treat, 2016, 57(3): 1058-1066.
- [5] FRUERGAARD T, HYKS J, ASTRUP T. Life-cycle assessment of selected management options for air pollution control residues from waste incineration [J]. Sci Total Environ, 2010, 408(20): 4672-4680.
- [6] 王玉涛, 王丰川, 洪静兰. 中国生命周期评价理论与实践研究进展及对策分析[J]. 生态学报, 2016, 36(22): 7179-7184.
- [7] 殷仁述, 杨沿平, 杨阳, 等. 车用钛酸锂电池生命周期评价[J]. 中国环境科学, 2018, 38(6): 2371-2381.
- [8] 宋小龙, 徐成, 杨建新, 等. 工业固体废物生命周期管理方法及案例[J]. 中国环境科学, 2011, 31(6): 1051-1056.
- [9] 王桐. 基于生命周期方法的煤制甲醇的水足迹研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2020.
- [10] 叶毓琛. 典型煤化工技术全生命周期评价[D]. 保定: 华北电力大学, 2014.
- [11] 孙元俊. 基于LCA的煤制甲醇清洁生产评价与对策研究[D]. 上海: 复旦大学, 2013.
- [12] 董庆华, 费正皓. 化工建设项目环境影响评价中提高清洁生产水平的方法探讨[J]. 应用化工, 2006, (12): 958-961+965.
- [13] 胡玉才, 宋俊芬, 姜丽, 等. 绿色化学研究进展[J]. 应用化工, 2005, (2): 67-71.
- [14] 陈歆. 生命周期评价(LCA)在清洁生产审核中的应用[D]. 苏州: 苏州科技大学, 2015.
- [15] 李晶莹. 焦化多联产系统的生命周期评价与系统分析[D]. 西安: 西北大学, 2018.
- [16] 顾知晓. 生命周期评价及软件工具GaBi在低碳经济中的广泛应用国外案例介绍[C]//第五届全国循环经济与生态工业学术研讨会暨中国生态经济学会工业生态经济与技术专业委员会 2010 年年会论文集. 天津, 中国生态经济学会, 2010.
- [17] 秦雪梅, 俞宁, 詹捷. 应用GaBi的两种汽车转向器防尘罩的绿色评价[J]. 重庆理工大学学报(自然科学), 2013, 27(10): 20-24.
- [18] 刘夏璐, 王洪涛, 陈建, 等. 中国生命周期参考数据库的建立方法与基础模型[J]. 环境科学学报, 2010, 30(10): 2136-2144.
- [19] 徐小宁, 陈郁, 张树深, 等. 复合硅酸盐水泥的生命周期评价[J]. 环境科学学报, 2013, 33(9): 2632-2638.
- [20] for suitability of heat pump use in distillation [M]//Computer aided chemical engineering. Elsevier, 2014, 33: 1327-1332.
- [21] 高晓新, 王天宇, 陈梦园, 等. 甲基丙烯酸甲酯/甲醇/水共沸体系变压精馏分离工艺的模拟与优化[J]. 天然气化工—C1 化学与化工, 2021, 46(2): 122-127.
- [22] LUYBEN W L. Design and control of the ethyl benzene process [J]. AIChE j, 2011, 57(3): 655-670.
- [23] MONDAL B, RANGAIAH G P, JANA A K. Optimizing algal biodiesel production from a novel reactive distillation based unit: Reducing CO<sub>2</sub> emission and cost [J]. Chem Eng Process Process Intensif, 2022, 176: 108948.
- [24] 岑昊, 叶青, 樊玉锋, 等. 塔釜闪蒸热泵辅助反应精馏生产丙酸丙酯新工艺[J]. 现代化工, 2020, 40(8): 190-193+197.
- [25] LI Y D, YE Q, WANG N G, et al. Energy-efficient extractive distillation combined with heat-integrated and intermediate reboilers for separating acetonitrile/isopropanol/water mixture [J]. Sep Purif Technol, 2021, 262: 118343.
- [26] FENG S Y, YE Q, XIA H, et al. Integrating a vapor recompression heat pump into a lower partitioned reactive dividing-wall column for better energy-saving performance [J]. Chem Eng Res Des, 2017, 125(9): 204-213.
- [27] PLESU V, RUIZ A E B, BONET J, et al. Simple equation

(上接第 82 页)

- [8] 张颂红, 姚克俭, 姚笛, 等. 异丙醇-水萃取精馏的复合溶剂选择和实验研究[J]. 高校化学工程学报, 2008, (3): 407-411.
- [9] 朱斌, 刘其松, 吴子波, 等. 工业级异丙醇连续生产电子级异丙醇[J]. 天然气化工—C1 化学与化工, 2009, 34(2): 67-69.
- [10] 朱登磊, 任根宽, 谭超. 萃取精馏分离异丙醇-水共沸体系的模拟与优化[J]. 化学工程师, 2009, 23(10): 13-16+22.
- [11] 程能林. 溶剂手册[M]. 北京: 化学工业出版社, 1994: 301.
- [12] 韩东敏, 陈艳红. 萃取精馏分离异丙醇-水共沸物的模拟及节能[J]. 化学工程, 2020, 48(2): 69-73.
- [13] CUI P Z, LIU X Y, ZHAO F, et al. Molecular mechanism, thermoeconomic, and environmental impact for separation of isopropanol and water using the choline-based DESs as extractants [J]. Ind Eng Chem Res, 2020, 59(36): 16077-16087.
- [14] 李成帅, 姚媛媛, 石会龙, 等. 低共熔溶剂分离异丙醇-水体系的研究[J]. 化学工程, 2020, 48(3): 32-36.
- [15] 孙健, 马世财, 霍成, 等. 碳中和目标下热泵技术应用现状及前景分析[J]. 华电技术, 2021, 43(10): 22-30.
- [16] 钱新华, 孙晓静, 王克峰, 等. 基于模拟分析技术和随机搜索算法的化工过程能量集成方法研究[J]. 高校化学工程学报, 2007, (2): 322-327.
- [17] PLESU V, RUIZ A E B, BONET J, et al. Simple equation

- [18] 高晓新, 王天宇, 陈梦园, 等. 甲基丙烯酸甲酯/甲醇/水共沸体系变压精馏分离工艺的模拟与优化[J]. 天然气化工—C1 化学与化工, 2021, 46(2): 122-127.
- [19] LUYBEN W L. Design and control of the ethyl benzene process [J]. AIChE j, 2011, 57(3): 655-670.
- [20] MONDAL B, RANGAIAH G P, JANA A K. Optimizing algal biodiesel production from a novel reactive distillation based unit: Reducing CO<sub>2</sub> emission and cost [J]. Chem Eng Process Process Intensif, 2022, 176: 108948.
- [21] 岑昊, 叶青, 樊玉锋, 等. 塔釜闪蒸热泵辅助反应精馏生产丙酸丙酯新工艺[J]. 现代化工, 2020, 40(8): 190-193+197.
- [22] LI Y D, YE Q, WANG N G, et al. Energy-efficient extractive distillation combined with heat-integrated and intermediate reboilers for separating acetonitrile/isopropanol/water mixture [J]. Sep Purif Technol, 2021, 262: 118343.
- [23] FENG S Y, YE Q, XIA H, et al. Integrating a vapor recompression heat pump into a lower partitioned reactive dividing-wall column for better energy-saving performance [J]. Chem Eng Res Des, 2017, 125(9): 204-213.