

燃料型炼油厂生产过程生命周期评价研究

高秋凤 张 芸[#] 徐筱竹 李 玮

(工业生态与环境工程教育部重点实验室,大连理工大学环境学院,辽宁 大连 116024)

摘要 石油炼制过程存在高盐废水排放、挥发性有机物(VOCs)生成等诸多环境问题,识别和量化该过程的环境影响是必要的。使用生命周期评价方法,对燃料型炼油厂生产的全过程进行环境影响分析,分别考虑了中点、终点环境影响类型。其系统边界包括9套主要装置和4套辅助装置。结果表明:燃料型炼油厂生产过程最大的终点环境影响类型是生态系统质量,主要由气候变化贡献,主要源于CO₂的现场排放;催化裂化装置的环境影响最大,但从单位加工量考虑,加氢装置的环境影响不容忽视;燃料型炼油厂降低环境影响应该从控制CO₂、VOCs的现场排放,提高能源利用效率以及选择来源更环保的辅剂等方面考虑。

关键词 燃料型炼油厂 生命周期评价 环境影响

DOI:10.15985/j.cnki.1001-3865.2022.06.012

Study on life cycle assessment of fuel refinery production process GAO Qiufeng, ZHANG Yun, XU Xiaozhu, LI Wei.
(Key Laboratory of Industrial Ecology and Environmental Engineering, MOE, School of Environmental Science and Technology, Dalian University of Technology, Dalian Liaoning 116024)

Abstract: The petroleum refining process has many environmental problems such as high-salt wastewater discharge and VOCs volatilization. It is necessary to identify and quantify the environmental impact of this process. The life cycle assessment method was used to analyze the environmental impact of the whole process of fuel refinery production. Environmental impact types at midpoint and endpoint level were considered respectively. The system boundary consisted of 9 sets of main devices and 4 sets of auxiliary devices. The results showed that the largest endpoint environmental impact type was ecosystem quality, which was mainly contributed by climate change, and mainly came from on-site emissions of CO₂. Catalytic cracking device had the largest environmental impact. However, considering the unit processing volume, the environmental impact of hydrogenation devices could not be ignored. The reduction of environmental impact of fuel refineries should be considered in terms of controlling on-site emissions of CO₂ and VOCs, improving energy efficiency and choosing more environmentally friendly adjuvants.

Keywords: fuel refinery; life cycle assessment; environmental impact

2020年我国石油消费量达到7.36亿t,是2010年的3.32倍。在“十四五”期间,随着“双碳”目标的不断推进,我国也将迎来石油需求的峰值。但是,原油的重质化、劣质化以及石油化工过程的复杂性,使得以石油炼制为代表的石化行业面临严峻的环境问题。而解决这些环境问题首先需要识别和量化石油炼制过程中的环境影响,确定关键的环境影响类型和装置。

生命周期评价(LCA)强调贯穿于产品生命周期的环境因素和潜在的环境影响^[1-2]。LCA作为一种综合的评价方法,其评价结果具备较高的合理性。目前,国内外针对石油炼制过程环境影响的研究并不少见。齐应欢^[3]对石油炼制过程的挥发性有机物(VOCs)排放特征以及臭氧、二次有机气溶胶生成潜力进行了评估;田涛等^[4]运用碳足迹分析了某石化

产品全生命周期内的温室气体排放;MORALES等^[5]对智利汽油全生命周期过程的环境影响进行了分析;杨秋颖等^[6]分析了以碳酸二甲酯为添加剂的汽油全生命周期内的环境影响;FURUHOLT^[7]建立了挪威生产常规汽油、甲基叔丁基醚(MTBE)调和汽油以及柴油的投入产出清单,并评价了这些产品带来的环境影响。上述研究分别针对石油炼制过程中的某种污染物或产品的环境影响进行了分析,但是石油炼制过程装置复杂,物质流动多样,存在多个共生产品,我们更需要从工业过程层面分析不同装置在生产过程中对环境的影响。刘业业^[8]评价了石油炼制过程中部分核心装置的环境影响,该研究不包含石脑油加氢、汽油加氢等加氢装置。然而随着我国油品质量的不断升级,这些加氢装置已成为炼油厂的必要装置,但它们对于石油炼制过程环

第一作者:高秋凤,女,1996年生,硕士研究生,主要从事生命周期评价研究。[#]通讯作者。

境影响的贡献尚不明确,因此有必要对其环境影响进行评价。

根据产品类型及侧重点的不同,石油炼制过程大致分为燃料型、燃料-润滑油型以及燃料-化工型^[9]。尽管从延长产业链、提高产品附加值考虑,向燃料-化工型转型是必然趋势,但目前我国石油炼制企业多数仍属于燃料型,故选择燃料型炼油厂作为研究对象更具有代表性。

综合上述分析,本研究以燃料型炼油厂作为研究对象,应用 LCA 方法定量评估其生产过程中产生的环境影响,识别其中关键的生产装置和环境影响类型,并进一步分析其产生原因,重点关注油品加氢升级装置带来的环境影响,以及 VOCs 现场排放所造成的环境影响。

1 研究方法

1.1 目的与范围确定

选取山东省某石油炼制企业为研究对象,该企业的生产规模和生产工艺均具有石油炼制过程的代表性和典型性。研究借助 GaBi 10.0 软件构建燃料型炼油厂生产过程的 LCA 模型,以识别其对环境影响贡献最大的生产装置和环境影响类型,为实现石油炼制过程节水、节能、减污目标提供理论依据。

本研究以 10 000 t 原油为功能单位,共生产品在各装置之间的分配按照研究对象实际情况处理。

根据刘业业^{[8]81-82}的研究结果,原油开采过程带来的环境影响远大于其炼制过程,而从炼油企业角度降低原油生产带来的环境影响的潜力并不大,故研究暂不考虑原油开采和运输过程带来的环境影响。此外,考虑到石油炼制过程产生的固体废物一般是由专门厂家回收处理的,并不涉及到企业的自行处理处置,故本研究也未考虑固体废物的处理处置过程带来的环境影响。

根据研究目标,确定系统边界,该系统包括主要生产装置和辅助生产装置两部分。主要生产装置涉及常减压蒸馏、催化裂化、延迟焦化、催化重整、催化柴油裂解(以下简称催柴裂解)、柴油加氢、石脑油加氢、汽油加氢、油品储存及收发等;辅助生产装置包括循环水系统、酸性水汽提、污水处理和制氢装置(见图 1)。各装置均涉及到辅剂、资源、能源的上游生产过程,现场污染物的排放以及废水、废气的处理过程。

1.2 清单分析

本研究中表层清单数据来自于研究对象的现场调研,背景数据来自于 GaBi 10.0 软件内置的数据库,其生命周期清单见表 1。由于目前所有数据库对于化工过程辅剂的生产信息都有所缺失,所以部分辅剂的背景数据采用其主要成分进行代替。其中,破乳剂用聚磷酸酯代替,十六烷值改进剂用硝酸酯代替,柴油抗磨剂用脂肪酸代替。此外,污水处理数据也来自于数据库。

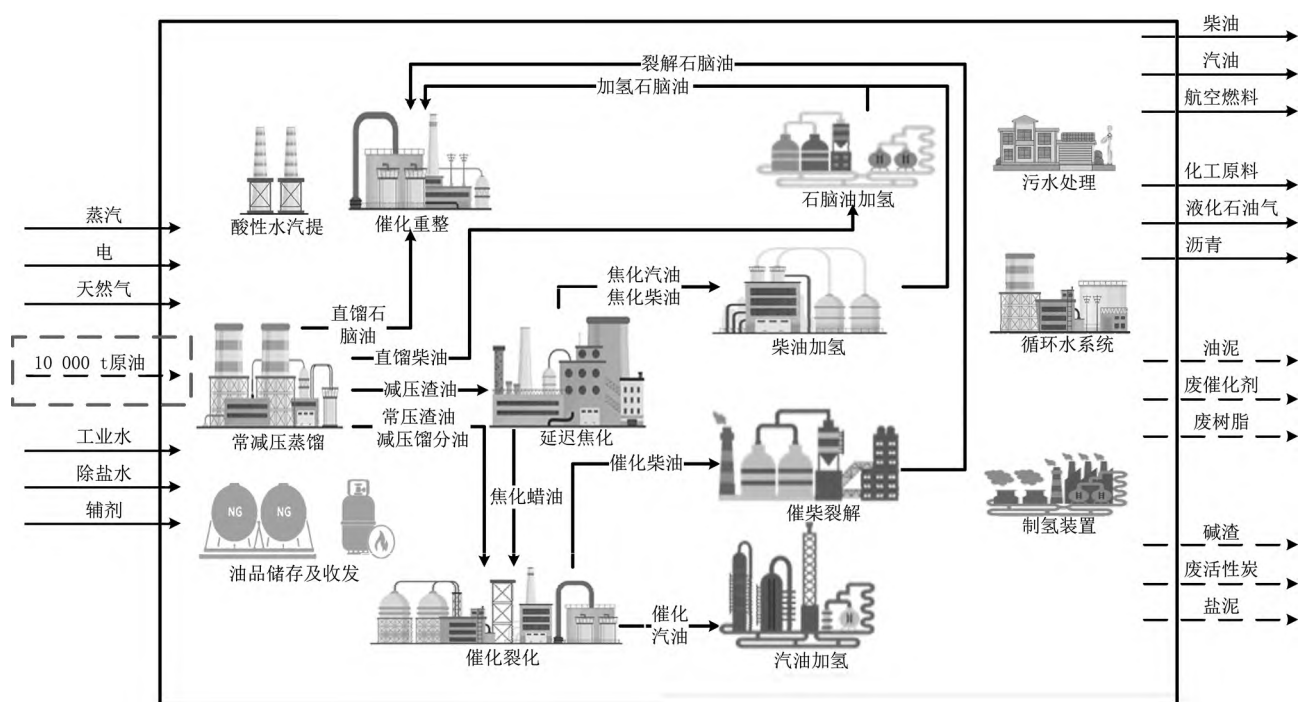


图 1 系统边界示意图

Fig.1 Schematic diagram of system boundary

表 1 燃料型炼油厂生产过程生命周期清单
Table 1 Life cycle list of fuel refinery production process

物质	单位	数值	输入/输出	物质	单位	数值	输入/输出
原油	t	10 000	输入	COD	kg	63.17	输出
工业水	t	1 362.76	输入	总磷	kg	7.93	输出
除盐水	t	1 997.39	输入	总氮	kg	6.58	输出
电	kW·h	564 369.8	输入	挥发酚	kg	0.02	输出
1.0 MPa 蒸汽	t	1 738.62	输入	硫化物	kg	0.03	输出
天然气	Nm ³	81 543.29	输入	可吸入颗粒物(PM ₁₀)	t	0.20	输出
破乳剂	t	0.32	输入	SO ₂	t	0.49	输出
缓蚀剂	t	0.48	输入	NO _x	t	2.24	输出
催化剂	t	6.14	输入	VOCs	t	3.44	输出
活性炭	t	0.28	输入	CO ₂	5	1 288.95	输出
液碱	t	8.25	输入	废催化剂	t	4.75	输出
消泡剂	t	0.08	输入	废树脂	t	0.11	输出
十六烷值改进剂	t	0.26	输入	油泥	t	3.12	输出
柴油抗磨剂	t	0.79	输入	碱渣	t	1.98	输出
其他辅剂	t	0.04	输入	废活性炭	t	0.28	输出
废水	t	2 401.8	输出	盐泥	t	0.04	输出
石油类	kg	0.83	输出	产品	t	9 681	输出

1.3 影响评价

根据清单分析所得数据,利用 GaBi 10.0 软件构建燃料型炼油厂生产过程 LCA 环境影响模型,并利用软件内置的 ReCiPe 2016 v1.1 (H)对模型进行处理,以识别和量化其生命周期内的环境影响。ReCiPe 2016 方法是以 Eco-Indicator 99 和 CML 2001 方法为基础建立的一种 LCA 方法^[10]。它可以从中点、终点两个水平对环境影响进行评估。同时,它不仅提供了全球范围的特征化因子,还提供了一些特定国家和地区的特征化因子以供选择。此外,与其他方法相比,它还构建了 20、100、1 000 年 3 种情景,以便满足不同的分析需求^{[11]15}。因此,本研究选择该方法用以综合评价燃料型炼油厂生产过程中的环境影响。

本研究中,中点环境影响类型包括 18 种(见表 2)。终点环境影响类型有人体健康(HH)、生态系统质量(ED)以及资源耗竭(RA)3 种。

表 2 中点环境影响类型与简称
Table 2 Midpoint impact categories and their abbreviation

类型	简称	类型	简称
气候变化	GWP	电离辐射	IRP
细颗粒物形成	PMFP	土地利用	LOP
化石资源耗竭	FFP	海洋生态毒性	METP
淡水消耗	WCP	海洋富营养化	MEP
淡水生态毒性	FETP	金属资源耗竭	SOP
淡水富营养化	FEP	陆地生态毒性	TETP
人类毒性(致癌)	HTPc	陆地酸性化	TAP
人类毒性(非致癌)	HTPnc	臭氧耗竭	ODP
光化学氧化(生态质量)	EOFP	光化学氧化(人体健康)	HOFP

2 结果分析与讨论

2.1 特征化评价结果

为了更好地体现主要生产装置对不同环境影响类型的贡献,将辅助生产装置的环境影响按照使用量分配到各主要生产装置。由图 2 可以看出:对于 GWP、PMFP、FFP、HTPc、HTPnc、IRP、LOP、METP、SOP、ODP、TAP、TETP 等 12 种环境影响类型来说,贡献较大的装置都是催化裂化、催化裂解和柴油加氢,其贡献率均在 14% 以上,造成这种现象的共同原因是大量的电力和蒸汽使用。此外,现场排放也是 GWP、IRP、PMFP 的主要贡献源,LOP、SOP 还受到辅剂上游生产过程的影响。

对 WCP,常减压蒸馏的贡献率达到 36.09%,这是因为常减压蒸馏加工量大,其生产过程中使用了大量的循环水、除盐水,此外乳化剂的上游生产过程也对其有一定影响;对 FETP,常减压蒸馏、柴油加氢、催化裂解、催化裂化是其主要贡献装置,因为这

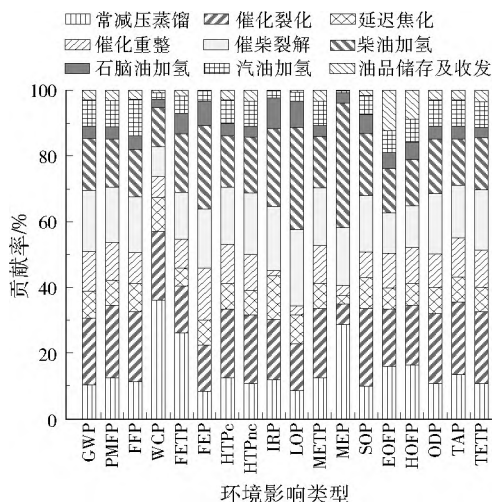


图2 燃料型炼油厂生产过程各装置对 midpoint 环境影响类型的贡献率

Fig.2 Contribution rates of various equipment on midpoint impact categories in fuel refinery production process

些装置所排放污水中有大量污染物；对于 FEP、

表3 燃料型炼油厂生产过程终点环境影响类型特征化评价结果

Table 3 Characteristic evaluation results of endpoint impact categories in fuel refinery production process

环境影响类型	常减压蒸馏	催化裂化	延迟焦化	催化重整	催柴裂解	柴油加氢	石脑油加氢	汽油加氢	油品储存及收发
HH	3.62×10^{-1}	6.74×10^{-1}	2.51×10^{-1}	3.77×10^{-1}	5.64×10^{-1}	4.85×10^{-1}	1.17×10^{-1}	2.52×10^{-1}	9.65×10^{-2}
ED	7.92×10^{-4}	1.38×10^{-3}	5.41×10^{-4}	7.99×10^{-4}	1.20×10^{-3}	1.06×10^{-3}	2.70×10^{-4}	5.26×10^{-4}	2.77×10^{-4}
RA	3.63×10^3	6.38×10^3	3.02×10^3	1.94×10^3	5.44×10^3	5.68×10^3	1.87×10^3	6.98×10^3	5.04×10^2

需要指出的是,对 FFP 这一中点环境影响类型,汽油加氢的贡献率为 11.12%,而在 FFP 对应的终点环境影响类型 RA 中,其贡献达到 19.71%。这是因为 FFP 是 ReCiPe 2016 方法中唯一没有恒定转换因子的中点环境影响类型,对于不同的化石能源有着不同的转换因子,其对天然气的转换因子是硬煤的 8.85 倍^{[11]25}。而在汽油加氢装置中使用了甲醇作为辅剂,其上游生产过程来自于数据库中“天然气制甲醇”,这使得从终点环境影响类型看,汽油加氢对 RA 的贡献明显增加。

2.2 归一化评价结果分析

3 种终点环境影响类型的归一化评价结果见图 3。其中 ED 最大,HH 次之;从装置看,催化裂化>催柴裂解>柴油加氢>常减压蒸馏>催化重整>汽油加氢>延迟焦化>油品储存及收发>石脑油加氢;尽管不同装置对不同环境影响类型的贡献存在差异,但所有装置对 3 种环境影响类型的贡献均是 ED>HH>RA。因此,从 ED 角度出发降低环境影响,是所有装置面对的共同问题。

对 ED、HH 两个终点环境影响类型进一步分析,由图 4(a)可知,在所有影响 ED 的中点环境影响类型中,FETP、FEP、LOP、TETP 分别占 ED 总环

MEP 来说,柴油加氢贡献最大,除来自于柴油抗磨剂等辅剂的上游生产过程外,制氢装置分配的环境影响也占了很大比例。

对 EOFP、HOF 来说,催化裂化、常减压蒸馏、催化重整、催柴裂解、柴油加氢对其贡献率均在 10%以上,环境影响主要来自于装置本身排放的 VOCs 以及循环水系统分配的 VOCs。其中常减压蒸馏和催化裂化加工量大、设备动静封点多、循环水消耗量也大;催化重整贡献较大是因为其原料为轻组分油,更易挥发。油品储存及收发装置是全场最大的 VOCs 排放源,故该装置对 EOFP 和 HOF 的贡献也不应该被忽视。

将 18 种中点环境影响类型转换为 3 种终点环境影响类型,结果见表 3。由表 3 可知,催化裂化、催柴裂解和柴油加氢对 HH、ED 和 RA 的贡献均较大,这与中点环境影响类型的分析结果是一致的。

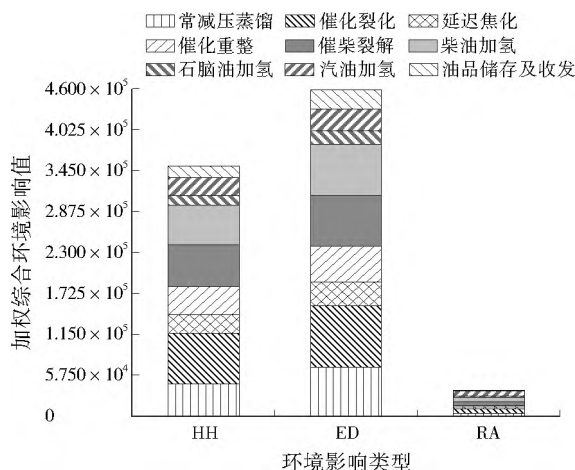


图3 燃料型炼油厂生产过程终点环境影响类型归一化评价结果

Fig.3 Normalized evaluation results of endpoint impact categories in fuel refinery production process

境影响的 1.26%、0.27%、0.02%、0.01%,影响较小,可以忽略;其余中点环境影响类型中,影响最大的是 GWP,EOF 次之。由图 4(b)可知,对 HH 贡献最大的中点环境影响类型是 HTPnc;在与 HH 有关的 8 种中点环境影响类型中,WCP、IRP 和 ODP 的贡献较小,其中 ODP 仅占 HH 总环境影响的 0.38%。

研究发现,4 套加氢装置中,催柴裂解和柴油加氢对总环境影响的贡献较大,石脑油加氢和汽油加

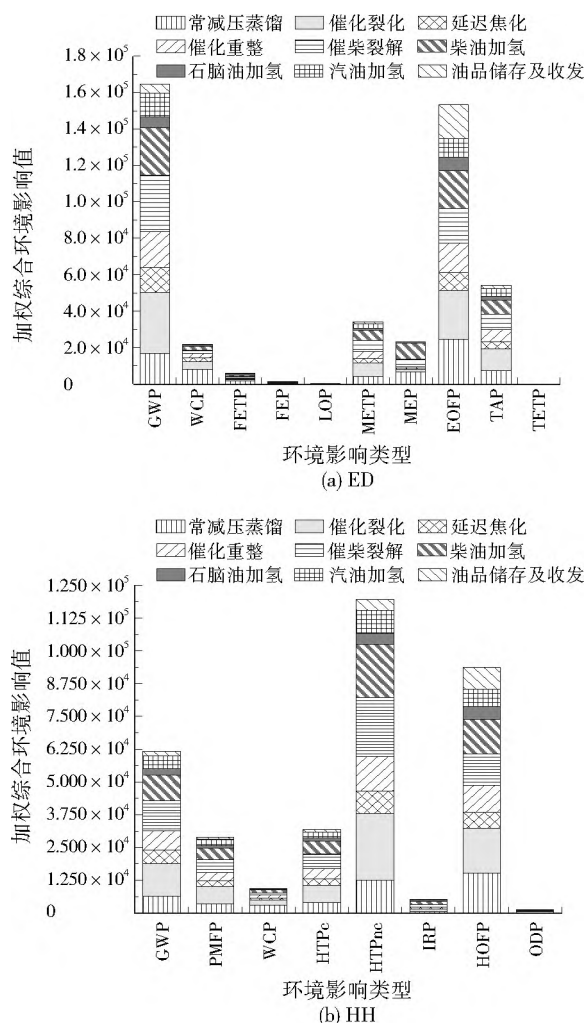


图4 ED和HH的中点环境影响类型贡献归一化评价结果
Fig.4 Normalized evaluation results of midpoint impact categories contribution to ED and HH

氢的贡献并不大。这是因为后两套装置的加工量相对较小,因此对应的物质消耗和污染物排放较低。而在考虑装置单位加工量的情况下,催柴裂解所带来的环境影响最大,其次是催化裂化、催化重整、汽油加氢、柴油加氢、延迟焦化,石脑油加氢和常减压蒸馏的环境影响较小,因此加氢装置的环境影响不容忽视。

参考 ReCiPe 2016 方法中各中点环境影响类型的贡献因素,发现与碳相关的主要是 GWP、ODP、EOFP 和 HOFP 这 4 种中点环境影响类型,由图 4 (b)可知,ODP 影响较小,可以忽略。对于 GWP 来说,现场 CO_2 的排放贡献了 78.32%,其余来自于原辅料和能源的上游生产过程;对于 EOFP、HOFP 来说,VOCs 的现场排放是其主要贡献源。因此,控制现场 CO_2 、VOCs 的排放对于石油炼制过程碳减排非常关键。此外,燃烧过程中产生 CO_2 受到能源结构、温度等多种因素的影响,所以从调整能源结构、

提高能源利用效率入手也能减少碳排放。

2.3 讨论

(1) 从污染物排放的角度来说,石油炼制过程中 VOCs 的现场排放是造成光化学氧化的重要原因,从碳减排的角度考虑,VOCs 也有一定贡献。因此有必要针对不同装置进一步分析其 VOCs 成因,采取有针对性的措施,例如为 VOCs 排放量较大的贮罐(如拱顶罐)安装蒸汽平衡、油气回收或处理设施^[12],根据装置烟气特性选择合适且经济的 VOCs 处理方法以及加强泄漏检测力度等。

(2) 催化裂化装置产生的环境影响最大,除电力、蒸汽的使用量大这一全厂共同因素外,还有催化剂烧焦过程以及辅剂的上游生产过程所带来的环境影响,催化裂化是整个生产过程的核心装置,因此筛选针对该装置特点的清洁生产技术可以显著降低整个生产过程造成的环境影响。

(3) 能源和原辅材料的上游生产过程对众多环境影响类型有较大贡献,因此从全生命周期的角度出发,下游选择能源类型和原辅材料时,如果可以考虑到其上游生产过程,选择上游生产过程环境影响小的工艺,例如选择焦炉气制备甲醇^[13],则整个生产过程的环境影响也会相应降低。

3 结论与建议

(1) 燃料型炼油厂生产过程对 ED 造成的影响最大,在影响 ED 的中点环境影响类型中,最大的是 GWP,主要是现场排放 CO_2 造成的。

(2) 燃料型炼油厂生产过程中,催化裂化产生的环境影响最大,主要是由电力、蒸汽的使用及辅剂的上游生产过程造成的;但如果从单位加工量的角度考虑,催柴裂解所带来的环境影响最大,其次是催化裂化、催化重整、汽油加氢、柴油加氢、延迟焦化,因此加氢装置的环境影响不容忽视。

(3) 燃料型炼油厂生产过程环境影响的降低可以从控制现场 CO_2 、VOCs 排放,提高能源利用效率以及选择来源更环保的辅剂等方面考虑。

参考文献:

- [1] ISO14040: 2006, Environmental management - life cycle assessment - principles and framework[S].
- [2] ISO14044: 2006, Environmental management - life cycle assessment - requirements and guidelines[S].
- [3] 齐应欢.石化行业挥发性有机物(VOCs)排放特征和环境影响分析[D].济南:山东大学,2018.
- [4] 田涛,韦桃平,王北星.石化产品全生命周期碳足迹评价研究[J].石油石化绿色低碳,2016,1(2):12-18.

(下转第 787 页)

以江苏睢宁农村小户数(3~10户)散点小集中处理为例,处理水量 $5\text{ m}^3/\text{d}$,采用罐体式MABR简易工艺一体化设备,占地约 20 m^2 ,进水COD在 $200\sim 500\text{ mg/L}$, NH_4^+ 在 $20\sim 40\text{ mg/L}$,TKN在 $40\sim 70\text{ mg/L}$,TP在 $1\sim 6\text{ mg/L}$ 。出水水质长期稳定在 $\text{COD}<30\text{ mg/L}$, $\text{NH}_4^+<1\text{ mg/L}$, $\text{TN}<15\text{ mg/L}$,出水用作农田灌溉。

以江苏常州农村多农户(50~60户)集中处理为例,处理水量 $20\text{ m}^3/\text{d}$,采用集装箱式MABR完整工艺一体化设备,占地约 50 m^2 ,出水设化学除磷设施。进水COD在 $150\sim 600\text{ mg/L}$, NH_4^+ 在 $20\sim 50\text{ mg/L}$,TKN在 $45\sim 80\text{ mg/L}$,TP在 $1\sim 5\text{ mg/L}$ 。出水水质长期稳定在 $\text{COD}<30\text{ mg/L}$, $\text{NH}_4^+<1\text{ mg/L}$, $\text{TN}<10\text{ mg/L}$, $\text{TP}<0.3\text{ mg/L}$,出水作为农村生态河道补水。

以湖南益阳谢林港大型村落污水管网组团收集处理为例,处理水量 $800\text{ m}^3/\text{d}$,采用槽钢一体化拼装结构MABR完整处理工艺,占地约 500 m^2 ,出水设同步化学除磷沉淀池和转盘滤池。进水COD在 $150\sim 200\text{ mg/L}$, NH_4^+ 在 $15\sim 20\text{ mg/L}$,TKN在 $25\sim 40\text{ mg/L}$,TP在 $3\sim 5\text{ mg/L}$ 。出水稳定在 $\text{COD}<20\text{ mg/L}$, $\text{NH}_4^+<0.6\text{ mg/L}$, $\text{TN}<5\text{ mg/L}$, $\text{TP}<0.3\text{ mg/L}$,出水作为农村生态小流域旱季补水。

缠绕卷式MABR工艺可实现生污泥(初沉污泥)、栅渣、生化污泥、化学污泥等固体废弃物源头分类,并且可将难生物降解的生物质——生化污泥源头减量,叠加上低能耗装机功率,此配置方式可很好地响应今后农村新能源“源网储荷”发展模式^[15],助力实现农村污水处理节能降耗、减污降碳。

4 结 语

通过缠绕卷式MABR工艺复合透氧膜材质、传氧和挂膜方式、膜组件和运行能耗综合分析,并结合实践应用,阐述农村污水组合工艺以及依附形成的一体化装置在水质提升、能耗节省、集约占地、方便运维方面极具优势。近期,笔者在无锡新城污水处理厂开展了微生物增强污泥减量生产性试验,实现了膜法工艺40%以上的源头生化污泥减量。该试验结果为缠绕卷式MABR耦合污泥减量菌,协同实现源头污泥减量奠定了技术示范。今后,在尾水灌溉和生态补水等既有资源化基础上,该工艺在污水污泥分类资源化利用、实现源头污泥减量等方面会更好助力农村污水处理领域,协同构建“无废乡村”。

参考文献:

- [1] 段先月,唐朝春,吴庆庆,等.农村污水现状及处理技术研究进展[J].水处理技术,2018,44(9):27-30.
- [2] 吕锡武.可持续发展的农村生化污水生态组合治理技术[J].给水排水,2018,44(12).
- [3] 赵霖林.农村环境综合整治生活污水治理现状与对策分析[J].资源节约与环保,2019,20(3):83-84.
- [4] 李发站,陆佳兴.农村生活污水存在的问题与对策[J].华北水利水电大学学报(自然科学版),2018,39(4).
- [5] 陈百明.农村社区更新理念、模式及其立法[J].自然资源学报,2000,15(2):101-102.
- [6] 汪舒怡,汪诚文,黄露.用于废水处理的膜曝气生物反应器[J].环境污染治理技术与设备,2006,7(6):131-132.
- [7] 曾庆楠,吴云,张宏伟,等.膜材料对膜曝气生物膜反应器性能影响的比较[J].化工学报,2016,67(4):1483-1484.
- [8] CECS 97—1997,鼓风曝气系统设计规程[S].
- [9] 孙勇.新冠肺炎疫情期间城镇水厂综合防控措施分析[J].能源环境保护,2020,34(4).
- [10] 苏伊士水务工程有限责任公司.得利满水处理手册(下册)[M].北京:化学工业出版社,2018.
- [11] TCHOBANOGLOUS G, STENEEL H D, TUSCHIHASHI R, et al. Wastewater engineering: treatment and resource recovery[M]. 5th ed. New York: McGraw-Hill Education, 2014.
- [12] DWA-M 376E. Treatment of industrial wastewater and process water with membrane process and membrane bioreactor technology[S].
- [13] 陈翼孙,胡斌.气浮净水技术[M].北京:中国环境科学出版社,1992.
- [14] 崔有为,王淑莹,宋学起,等.NaCl盐度对活性污泥处理系统的影响[J].环境工程,2004,22(1):19-21.
- [15] 彭石,刘文,陈万喜,等.大量可再生能源接入下的电力系统灵活性指标及评价综述[J].中国科技成果,2019,41(7):42-47.

编辑:陈泽军 (收稿日期:2022-01-06)

(上接第767页)

- [5] MORALES M, GONZALEZ GARCÍA S, AROCA G, et al. Life cycle assessment of gasoline production and use in Chile[J]. Science of the Total Environment, 2015, 505: 833-843.
- [6] 杨秋颖,张芸,孙德林,等.碳酸二甲酯为添加剂的汽油生命周期评价研究[J].环境污染与防治,2021,43(2):229-231,254.
- [7] FURUHOLT E. Life cycle assessment of gasoline and diesel[J]. Resources Conservation and Recycling, 1995, 14(3/4): 251-263.
- [8] 刘业业.石油炼制工业过程碳排放核算及环境影响评价[D].济南:山东大学,2020.
- [9] 徐艳杰,卢艳娟.谈石油炼制化工工艺[J].民营科技,2012(12):70.
- [10] 刘宇彤.我国工业VOCs集中处理生命周期评价及技术经济研究[D].长春:吉林大学,2019.
- [11] HUIJBREGTS M A J, STEINMANN Z J N, ELSHOUT P M F, et al. ReCiPe2016: a harmonized life cycle impact assessment method at midpoint and endpoint level. Report I: characterization [R]. Bilthoven: National Institute for Human Health and the Environment, 2016.
- [12] 李凌波,刘忠生,方向晨.炼油厂VOC排放控制策略——储运、废水处理、工艺尾气、冷却塔及火炬[J].当代石油石化,2013,21(10):4-12.
- [13] 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.

编辑:徐婷婷 (收稿日期:2021-09-29)