

• 煤炭清洁高效低碳利用专题 •

能源和环境问题是当今全球关注的热点问题。面对中国“富煤、贫油、少气”的资源禀赋,以煤炭为主的能源结构短期内难以改变。因此,在当前“双碳”背景下,加快煤化工全产业链绿色转型,系统推动节能降碳,已成为能源化工行业的中中之重。为进一步促进煤炭清洁高效低碳利用领域学术交流,本期分别介绍了西北大学、西北师范大学、延安大学相关团队在煤化工全生命周期分析、二氧化碳转化制化学品、煤基新材料领域的最新研究成果,旨在梳理煤炭清洁高效低碳利用相关领域的前沿进展,汇聚凝练关键科学问题,以期为国家“双碳”目标实现提供科技参考。

生命周期评价在焦化领域中的应用及研究进展

史帆,李晶莹*,张穗穗,屈佩玺,唐团团,徐龙,马晓迅

(西北大学化工学院;碳氢资源清洁利用国际科技合作基地,陕西西安710069)

摘要:焦化行业作为传统的煤化工产业,目前仍存在高能耗、高污染、产能过剩等问题。生命周期评价(Life Cycle Assessment,简称LCA)作为一种系统地评价产品或工艺过程整个生命周期环境影响的评价方法和管理工具,目前已经广泛应用于各行各业。在焦化过程中引入LCA方法可以为行业的绿色可持续发展提供系统的理论指导和决策依据。本文简述了LCA的理论方法和技术框架,对焦化领域的LCA相关文献进行分析,并综述了LCA方法在焦化生产、焦炉煤气下游利用以及焦化废水处理方面的应用和研究进展。重点从目标与范围的确定、生命周期清单数据的获取、生命周期影响评价方法、影响类型和解释结果等方面探讨了焦化领域LCA的研究现状,指出了目前存在的主要问题,如系统边界界定和相关细节假定交代不清晰、分配方法不明确、数据来源和质量良莠不齐、本地化清单数据库较为缺乏、生命周期影响评价方法选取不统一、结果解释不够完整等一系列问题。最后,基于当前焦化领域LCA的研究现状和亟待解决的问题,对未来焦化过程中的LCA发展提出建议,认为焦化过程中的LCA应该从明确系统边界、建立全面的本土化生命周期清单数据库、选择合理的分配方法以及评价指标多元化4个关键方面加强研究。

关键词:焦化领域;生命周期评价;温室气体;能耗;可持续性

中图分类号:TQ021.8

文献标识码:A

文章编号:1004-602X(2023)02-0001-07

焦化行业是化工行业的中坚力量,对国民经济发展起着重要作用。多年来,中国一直是世界上最大的焦炭生产、消费和贸易大国,截至2021年底,中国焦炭产量约4.64亿t,消费量占全球总量的69%左右^[1]。然而,焦化行业作为传统煤化工行业,高污染、高能耗情况比较严重。随着我国力争在2030年前实现碳

达峰、2060年前实现碳中和战略目标的提出,坚持系统观念,加快产业结构调整,大力推行焦化清洁生产,构建多产业链条,系统推动节能降碳,实现绿色可持续发展是焦化行业发展的新方向^[2-3]。传统研究通常侧重于生产阶段,不考虑生产上游资源消耗和环境影响,缺乏系统性分析与评估。可持续发

收稿日期:2023-04-17

基金项目:国家自然科学基金项目(22008198)

作者简介:史帆(1998—),女,陕西渭南人,西北大学硕士研究生。

*通信作者:李晶莹(1990—),女,陕西宝鸡人,西北大学副教授,博士,主要从事化工过程生命周期可持续评价与多目标集成优化方面研究。E-mail:lijingying99@nwnu.edu.cn

展要求从全生命周期角度出发,全面考察产品生命周期过程的环境影响和能源利用效率,这对焦化过程提出更严格的要求。生命周期评价(Life Cycle Assessment, 简称为 LCA)是一种“从摇篮到坟墓”系统化地定量描述产品生命周期中的各种资源、能源消耗和环境排放并评价其环境影响的国际标准方法^[4]。鉴于其全面性和系统性,LCA 已成为国际公认的进行环境管理、可持续发展评估和生态设计的主要工具。目前,LCA 已广泛应用于各行业评估和改进特定的产品系统^[5],如在废物管理^[6]、建筑行业^[7]、农业系统^[8]、钢铁行业^[9]、电力行业^[10]等。在焦化领域,引入 LCA 方法,可准确且全面地定量化评估产品从原材料获取、运输、生产、使用、再循环到最终处理等各阶段环境影响,寻求节能减排的改进方向。基于其全面性和系统性,LCA 可对比分析同一产品不同替代途径以及不同产品实现同一功能的环境优劣性,避免环

境问题的转移^[11]。因此,应用 LCA 方法对焦化行业的绿色低碳可持续发展具有极为重要的意义。本文简述了 LCA 理论框架,总结和分析了 LCA 在焦化领域的应用和存在问题,并对其未来发展提出相关建议,以期为焦化行业 LCA 研究提供理论指导和参考。

1 LCA 方法简述

如图 1 所示,LCA 起源于 20 世纪 60 年代末美国的资源和环境概况分析 REPA 被称之为“现代 LCA”的先驱。1990 年环境毒理学和化学协会(SETAC)第一次提出了“生命周期评价”这一概念^[12]。2006 年国际标准组织先后发布 ISO 14040 和 ISO 14044 两个标准,为 LCA 理论提供了基本框架^[13]。进入 21 世纪后,以欧盟国家、美国、日本为代表的 LCA 学者进一步推动了 LCA 理论的深入研究,这也引起了亚洲、非洲和南美洲的关注,LCA 在全球范围内得到了迅速的发展^[12]。

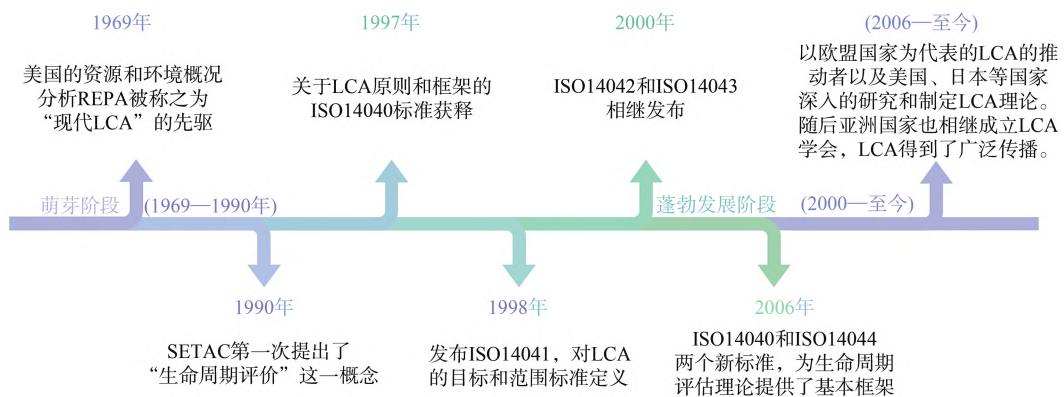


图1 LCA的发展历程

根据 ISO14040 标准,LCA 方法包括 4 个相互联系且不断重复的步骤^[13]:目标和范围的确定、清单分析、影响评价和结果解释(图 2)。首先,确定研究的目标和范围,然后收集数据列出各单元的输入输出清单,再对清单中的能量、物质的消耗以及对环境的排放进行量化分析,确定影响类型以及权重大小。根据影响评价对整个产品/系统/工艺过程进行生命周期解释,识别薄弱环节以及潜在的改善机会,对整个生命周期过程得出结论^[14]。

2 LCA 方法在焦化领域的应用

目前,LCA 方法已经广泛应用到焦化生产、焦炉煤气下游利用以及焦化废水处理过程。通过对产品环境影响定量化分析,LCA 方法已成为焦化产品系统识别环境问题和优化改进方案的重要决策工具^[15]。

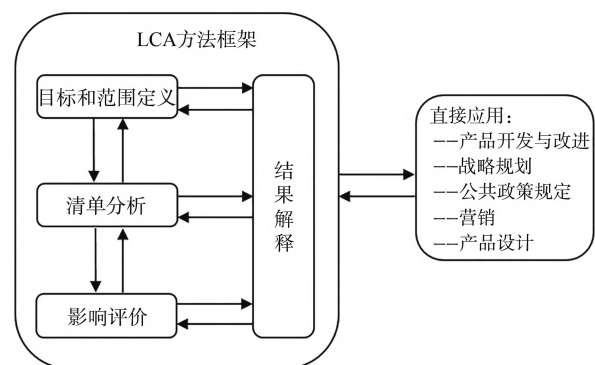


图2 LCA方法的技术框架^[13]

2.1 焦化生产工艺及焦炉煤气下游利用路径

2.1.1 焦化生产工艺

如图 3 所示,通常焦化生产过程分为两部分:炼焦部分和化产部分。具体如下:

1) 炼焦部分:经备煤、装煤后,将炼焦煤送入炭化室,再经高温(950 ℃~1 050 ℃)干馏变成焦

炭,并放出荒煤气由管道输往回收车间;得到的焦炭用推焦机从炭化室推出,进入熄焦塔熄焦;随后进入晾焦台,最后进行筛焦分成各级焦炭。

2)化产部分:在炼焦过程产生的化学产品经过回收、加工提取煤焦油、氨、硫磺、硫铵、粗苯等产品,同时获得焦炉煤气。主要分为鼓冷工段、脱硫工段、硫铵工段、粗苯工段4个工段^[16]。

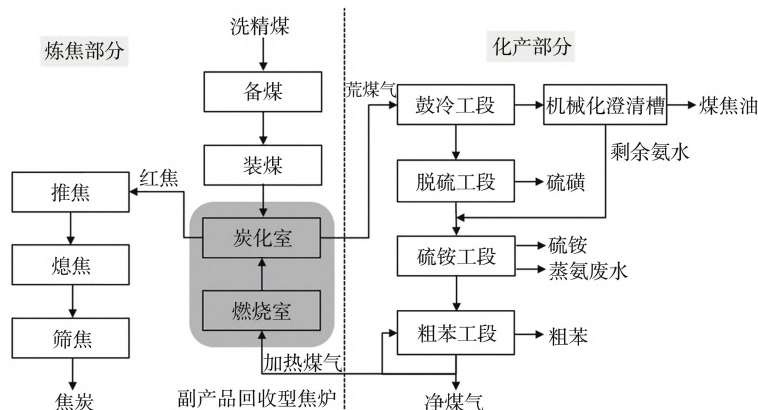


图3 焦化生产工艺流程图

2.1.2 焦炉煤气下游利用路径

焦炉煤气(coke oven gas,简称COG)作为高附加值的焦化副产品,年产量约为1 900亿m³,占全球总产量的50%以上^[17]。鉴于其富含氢气(55%~60%)、甲烷(23%~27%),既可作燃料也可用作化工原料,如焦炉煤气制甲醇^[18]、制天然气^[19]、制氢^[20]、合成氨^[21]、发电^[22]等。目前,LCA方法已广泛应用于焦炉煤气下游利用路径。

2.2 LCA方法在焦化领域的应用

2.2.1 焦化生产过程

在焦化生产过程中,有学者采用LCA方法对单位量焦炭产品进行了系统性评估与改进研究,多考察能源消耗、温室气体排放等环境影响。如WU等^[23]对中国西北地区焦化工业进行了生命周期温室评估,表明减少独立的炼焦厂有利于提高能源利用率和减少排放;LI^[24]利用LCA和经济性方法分析比较了气化焦和冶金焦技术路径的经济效益、能耗和CO₂排放。结果表明,生产气化焦是焦炭行业转型发展的可行技术途径;JHA等^[25]对传统焦炭烧结方法和环保生物质烧结方法之间进行了生命周期对比评估,比较两者之间的经济和环境性能。结果表明,生物质掺入带来的生产成本降低了10%;HONG等^[26]从宏观层面对中国焦炭生产进行了“摇篮到大门”的生命周期环境影响评价,并对比了湿法熄焦和干法熄焦2种方法的环境性能。然而,焦化生产涉及多产品输出问题,环境负担的分配问题不可避免。LIU等^[27]基于LCA方法对于干法熄焦和湿法熄焦

2种焦炭生产过程进行了“从摇篮到大门”的生命周期环境影响评价,环境负担的分配主要基于多种产品的能量分配;LI等^[28]采用细分法对1 t焦炭的LCA结果进行了分析,并与物理和经济分配方法进行了比较。上述文献均只考察了焦化生产阶段的生命周期环境影响及改进分析。

2.2.2 焦炉煤气下游利用

以焦炉煤气为核心的下游利用的LCA研究多侧重于与传统路线的比较研究。如KANG等^[29]根据经过验证的动力学研究设计了一种从COG制甲醇的大规模工艺,对COG制甲醇过程进行了“从摇篮到大门”生命周期评估,并与传统路径进行对比研究。结果表明,COG制甲醇路径的全球变暖潜值比传统路径低64.8%;CHEN等^[30]对煤制甲醇(CTM)、焦炉煤气制甲醇(CGTM)和天然气制甲醇(NTM)3种甲醇生产路线进行了生命周期评估,认为电力生产是造成环境影响的关键因素;YAO等^[31]对汽油、煤炭、焦炉煤气、天然气4条制甲醇路线进行了生命周期评估,重点评估了一次能源使用、温室气体排放、水耗和污染物排放(SO_x和NO_x)。此外,LI等^[32]基于LCA方法比较了4种LNG生产方式的环保性能,结果表明,焦炉煤气甲烷化过程具有较好的环境性能;WANG等^[33]比较了COG、煤、天然气、生物质、电网混合和可再生能源产氢过程的化石能源消耗和碳排放,发现COG制氢是除生物质和可再生能源外的最佳选择;BURMISTRZ等^[34]对清洁焦炉煤气制氢技术的碳足迹进行了分析,结果表明这些

指标与整个产品生命周期中电力和热能的净产量以及二氧化碳的直接排放有关。在制合成氨方面, LI 等^[35]比较了 3 条基于 COG 的氨生产路线(即单氨、氨联产甲醇、氨联产 LNG)产生的环境影响,并讨论了氨合成压力和电力来源对整体环境的影响,旨在为 COG 制合成氨生产的可持续发展提供更实用和建设性的建议。另外,焦炉煤气下游利用还集中于不同路径的对比研究。如 REN 等^[36]通过 LCA 结合 LCC 确定环境和经济最优情景,探索环境和经济改善的来源,量化焦炉煤气的各种利用路径(即制甲醇、制氢以及制合成天然气)的碳减排潜力;LIU^[37]等从能源供应的角度,采用 LCA 方法研究了焦炉煤气制氢、天然气、甲醇的能源消耗、碳排放、资本投资和产品成本,并采用熵权法对其综合竞争力进行了比较。结果表明,COG 制甲醇路径是最具竞争力的利用方案。综上,焦炉煤气下游利用路径主要集中于制甲醇、氢、天然气方面,且缺乏对不同路径之间关于环境-技术-经济 3 个方面的综合评价。

2.2.3 焦化废水处理

为实现焦化行业可持续发展,如何处理焦化废弃物成为了焦化行业重点关注的问题。LCA 作为评价决策工具为废弃物的可持续性利用提供正确的理论指导。如赵雅思等^[38]从能源、经济、环境 3 个方面对焦化废水处理过程中产生的三类固相物质的不同处置方式进行 3E 评价,构建了生命周期能源消耗决策模型、环境影响决策模型和经济性评价决策模型,最终得出最优固相物质处置方案;ZHANG 等^[39]对中国 3 种典型的焦化废水处理工艺进行了评价。结果表明,富营养化对整体环境影响有主要贡献。改善出水水质可以显著减少对环境的总体影响。从经济角度看,原材料价格是影响综合治理运行成本的主要因素。此外,废水处理过程中的 LCA 方法除了集中在气候变化影响的研究外,还应用于成本效益分析方面,如 ZHOU 等^[40]对集好氧生物处理和两级吸附于一体的新型废水处理系统进行了能效评估和成本效益分析,结果表明,该新型废水处理系统优化焦化废水处理系统中的能量平衡,成本费用也得到了提高。纪振宇^[41]基于 LCA 方法,分析了焦化废水处理系统和煤气化废水处理系统的污染物去除效能和环境影响,为煤化工废水处理提出了节能减排的方案。综上,目前,关于焦化废水处理过程的 LCA 研究较少,主要集中于几种不同生产工艺的对比研究,且研究对象单一。

3 LCA 方法在焦化领域存在的问题

迄今为止,LCA 方法已较为成熟,在焦化领域的应用也取得了良好的效果,但在实践过程中仍存在一些值得注意的问题以及需要改进地方。本文基于 LCA 研究框架的 4 个基本步骤,分析探讨焦化领域 LCA 研究存在的问题。

1) 目标与范围的确定

定义系统边界是 LCA 的基础。根据研究目标不同,系统边界分为 4 个主要系统^[42]:“从摇篮到坟墓”、“从摇篮到大门”、“从大门到大门”以及“从大门到坟墓”。对于焦化产品,由于下游用途广泛,针对特定用户才能开展“从摇篮到坟墓”的研究。因此,大多数的研究边界多采取“从摇篮到大门”^[18,20,32],即从原材料开采做到产品的生产过程;还有少部分采用“大门到大门”研究^[43]。功能单位的选取方面,多采用单位量的产品,如 1 t 焦炭、1 t 甲醇、1 kg 氢气等,方便不同替代路线的对比研究;还有研究选取年产量作为功能单位^[40]。关于废弃物处理方面的研究中,系统边界为“从大门到坟墓”,功能单位为处理单位量的废弃物^[38-39]。目前,较少研究能做到真正意义上的全生命周期评价。存在的主要问题是各研究边界不统一,部分研究原料和中间产品运输阶段的环境影响未考虑在内^[27]。为了简化系统,已有研究均未考虑相关的基础设施、设施建设过程中产生的环境影响^[37,41]。此外,焦化生产中多功能系统的分配也是一个争议性问题,比如共生系统副产品或废弃物综合利用系统。现有研究大多数采用物理关系方法分配,如质量分配^[18]、能量分配等^[27]。少数焦化产品生产研究有用经济分配法^[20],系统扩展法较少见。有的未考虑副产品的贡献,将环境影响全归类到主产品^[18]。不同的分配方法导致即使同一研究对象研究结果也截然不同,缺乏统一性和比较性^[44]。另外,部分研究相关细节和假定交代不清晰,比如原材料的来源差异、工业生产规模影响、使用寿命和处置程序等^[43]。为更全面了解焦化生产过程生命周期的环境影响,在有数据条件的情况下应适当扩大系统边界和细化研究过程。

2) 清单分析

清单分析中数据的来源和质量直接决定 LCA 评估的可靠性和完整性。现有焦化领域 LCA 研究中,大多数前景数据来自案例企业现场生产数据和年度报表等^[22,32,34],部分研究采用统计年鉴^[18,21]、参考

文献^[32,36]、软件模拟结果^[29,45]以及相关假设^[34]等。根据王洪涛课题组的研究报道^[46],数据可靠性按如下来源依次递减,分别为:实验测试和现场调查原始数据或工厂年度报表、国家统计局的统计公报或年鉴定期更新数据、参考文献数据、基于文献或经验的推论、估计或假设、无根据的假设或推理。因此,不同数据来源需要对其进行不确定性分析。背景数据方面,现有研究基本调用 Ecoinvent 数据库^[27,47]、Gabi 数据库^[28,32]、中国的 CPLCID 数据库^[39,47]等。然而,在数据的地理代表性和技术代表性方面,由于本地化数据相对较少,在未能直接获取本地化技术代表性生产数据时,很多研究使用全球平均数据或欧盟国家数据^[18,32],不可避免地增加了不确定性。因此,亟需进一步开发本土区域化 LCA 数据库。此外,大部分研究中数据年限较为陈旧,存在不能及时更新、且部分工艺排放数据缺失等数据不完整问题,都会造成结果的不确定性^[32,38-39]。

3) 生命周期影响评价

在生命周期环境影响评价上,基本遵循了2种方法:面向环境问题的方法(中点)和面向损害的方法(终点)。目前,基于“中点”类型的 CML2001 方法^[28,32]、ILCD 方法^[39]和基于“终点”的 IMPACT2002+ 和 ReCiPe 方法^[27-28]应用最为广泛。大多数焦化领域 LCA 研究倾向于“中点”分析,只做到分类和特征化阶段,降低研究的不确定度。其中,选取的环境影响类型多包括:非能源资源消耗、初级能源消耗、全球变暖、臭氧层消耗、光化学污染、富营养化、酸化、人体毒性、水消耗等。少部分考虑了加权和标准化,选取的基准值采用全球或者某区域(如欧盟、美国)的人均消耗或排放总量^[28]。在“终点”评价方面,部分研究仅从单一角度(如生态毒性影响)评估生产过程中产生的环境影响,未能考虑到其他影响^[48]。目前,各研究选取的评价方法尚不统一。由于每种方法侧重的环境因子、权重和影响因子不同,同一研究对象选用不同模型会存在结论冲突的问题。

4) 结果解释

生命周期评价的结果解释需建立在系统边界、数据源、分配原则等具体内容上,但由于各种条件限制(数据、时间、地理因素),无法对所有的环境影响进行评估,增加环境影响类别会造成结果的不确定性。现有焦化领域 LCA 研究多侧重于识别某案例产品生命周期过程关键环节和物质,以及对比不

同路线的优劣性,对导致该影响和结论背后的原因缺乏深入的探讨与挖掘,对未来的改进方向缺乏讨论^[36-37]。使用数据的准确性和全面性是 LCA 研究的重要基础,因此对 LCA 评价结果的敏感性分析和不确定性分析已成为 LCA 研究的关键步骤。目前,已有部分研究做了敏感性分析、蒙特卡洛不确定性分析等,考察输入物质、生产影响因素等对 LCA 最终结果的影响^[20,28,35]。然而,仍有很多研究欠缺对结果的敏感性和不确定性分析,结果解释不完整等问题。

4 结论与展望

LCA 作为一种科学的系统化评价方法,目前已广泛应用于焦化领域的焦化生产、焦炉煤气下游利用、焦化废水处理等多方面,多用于产品生命周期过程中环境热点的识别和不同替代路径的环境性能的对比研究。然而,目前仍存在如系统边界界定和相关细节假定交代不清晰、分配方法不明确、数据来源和质量良莠不齐、本地化清单数据库较为缺乏、生命周期影响评价方法选取不统一、结果解释不够完整等一系列问题。基于当前 LCA 在焦化领域的研究现状和亟待解决的问题,提出了以下几条建议:

1) 明确系统边界

依据研究目标和功能单位,从生命周期阶段范围、地理范围(材料来源、技术来源、运输距离等)、时间有效性、分配方法等方面明确系统边界。尽可能细化系统边界内的研究内容和假定,对比不同方式造成的环境影响时系统边界设定必须一致,从而促进该过程 LCA 研究的统一性和可类比性,避免重复研究。

2) 建立全面的本土 LCA 数据库

鉴于不同国家、不同区域的生产材料和技术上的差异性,直接调用平均水平数据库缺乏针对性,导致结果的不确定性较大。因此,建立健全的、符合中国国情的高数据质量的本土区域化生命周期清单数据库仍然是目前中国 LCA 研究发展的重要方向之一,尤其是针对焦化领域的专门数据库,这样评价结果会更加精准可靠。

3) 选择合理的分配方法

焦化生产为多产品输出系统,需要考虑共生系统副产品的环境负荷问题,分配不可避免。具体的分配方法要根据具体案例的研究系统和目标来选择。如当系统中包括多个与产品生命周期无关的子

过程时,可采用细分法进行分配;当共生产品较少且有替代工艺数据,可采用系统扩展法;当多产品输出系统的各产品存在质量、数量、能量等物理属性关系,可以选择物理关系分配方法,如能量分配、质量分配;当系统中产品生产受市场经济影响,且主、副产品产值相差较大时,选用经济分配法。

4)评价指标的多元化

生命周期评价多以环境影响评价为主,从可持续发展角度难以权衡经济、社会等多方面的影响。基于绿色可持续发展和实现“双碳”目标的大背景下,未来焦化领域的 LCA 发展应以更加多元化、系统化的生命周期可持续性评价为导向。因此,在现有 LCA 模型基础上纳入经济和社会指标使其成为一个更具包容性的可持续性分析的评价模型是非常必要的。

参考文献:

- [1] 张大鹏. 2021 年我国炼焦业运行情况分析[J]. 中国钢铁业, 2022(1): 29-33.
- [2] 中国炼焦行业协会. 焦化行业碳达峰碳中和行动方案(节选)[J]. 煤化工, 2022, 50(4): 1-2.
- [3] 张雅欣, 罗荟霖, 王灿. 碳中和行动的国际趋势分析[J]. 气候变化研究进展, 2021, 17(1): 88-97.
- [4] RYDING S. ISO 14042 Environmental management. Life cycle assessment. life cycle impact assessment[J]. The International Journal of Life Cycle Assessment, 1999, 4: 307.
- [5] HELLWEG S, CANALS L M I. Emerging approaches, challenges and opportunities in life cycle assessment[J]. Science, 2014, 344(6188): 1109-1113.
- [6] CHRISTENSEN T H, DAMGAARD A, LEVIS J, et al. Application of LCA modelling in integrated waste management[J]. Waste Management, 2020, 118: 313-322.
- [7] 段海燕, 陈思颜, 刘源源, 等. 生命周期视角下中国建筑能源区域消耗特征研究[J]. 中国人口·资源与环境, 2020, 30(7): 57-65.
- [8] 徐湘博, 孙明星, 张林秀. 农业生命周期评价研究进展[J]. 生态学报, 2021, 41(1): 422-433.
- [9] CUI L, BA K M, LI F Q, et al. Life cycle assessment of ultra-low treatment for steel industry sintering flue gas emissions[J]. Science of the Total Environment, 2020, 725: 138292.
- [10] HAN S, KIM S, KIM Y T, et al. Optimization-based assessment framework for carbon utilization strategies: Energy production from coke oven gas[J]. Energy Conversion and Management, 2019, 187: 1-14.
- [11] 王彦哲, 周胜, 王宇, 等. 中国核电和其他电力技术环境影响综合评价[J]. 清华大学学报(自然科学版), 2021, 61(4): 377-384.
- [12] GUINÉE J B, HEIJUNGS R, HUPPES G, et al. Life cycle assessment: past, present, and future[J]. Environmental Science & Technology, 2011, 45(1): 90-96.
- [13] FINKBEINER M, INABA A, TAN R, et al. The new international standards for life cycle assessment: ISO 14040 and ISO 14044[J]. The International Journal of Life Cycle Assessment, 2006, 11(2): 80-85.
- [14] GUINÉE J B. Handbook on life cycle assessment operational guide to the ISO standards[J]. The International Journal of Life Cycle Assessment, 2002, 7(5): 311.
- [15] RAIMBAULT M. Environmental management-life cycle assessment[J]. ISO Focus, 2006(6): 3.
- [16] 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.
- [17] YANG Q C, ZHANG C W, ZHANG D W, et al. Development of a coke oven gas assisted coal to ethylene glycol process for high techno-economic performance and low emission[J]. Industrial & Engineering Chemistry Research, 2018, 57(22): 7600-7612.
- [18] LI J Y, MA X X, LIU H, et al. Life cycle assessment and economic analysis of methanol production from coke oven gas compared with coal and natural gas routes[J]. Journal of Cleaner Production, 2018, 185: 299-308.
- [19] KHATAMI JOUYBARI A, ILINCA A, GHORBANI B. Thermo-economic optimization of a new solar-driven system for efficient production of methanol and liquefied natural gas using the liquefaction process of coke oven gas and post-combustion carbon dioxide capture[J]. Energy Conversion and Management, 2022, 264: 115733.
- [20] LI J J, CHENG W J. Comparative life cycle energy consumption, carbon emissions and economic costs of hydrogen production from coke oven gas and coal gasification[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2020, 45(51): 27979-27993.
- [21] ZHAO Y X, ZHAO Y J, YI Q, et al. Highly flexible and energy-efficient process for converting coke-oven gas and pulverized coke into methanol and ammonia using chemical looping technology[J]. Energy Conversion and Management, 2021, 248: 114796.
- [22] HAN S, KIM S, KIM Y T, et al. Optimization-based assessment framework for carbon utilization strategies: Energy production from coke oven gas[J]. Energy Conversion and Management, 2019, 187: 1-14.
- [23] WU J N, PU G Y, GUO Y, et al. Retrospective and prospective assessment of exergy, life cycle carbon emissions, and water footprint for coking network evolution in China[J]. Applied Energy, 2018, 218: 479-493.
- [24] LI Y, WANG G S, LI Z H, et al. A life cycle analysis of

- deploying coking technology to utilize low-rank coal in China[J]. Sustainability, 2020, 12(12):4884.
- [25] JHA G, SOREN S, MEHTA K. Life cycle assessment of sintering process for carbon footprint and cost reduction: comparative study for coke and biomass-derived sintering process [J]. Journal of Cleaner Production, 2020, 259: 120889.
- [26] HONG J L, ZHANG F F, XU C Q, et al. Evaluation of life cycle inventory at macro level: A case study of mechanical coke production in China [J]. The International Journal of Life Cycle Assessment, 2015, 20(6): 751–764.
- [27] LIU X, YUAN Z W. Life cycle environmental performance of by-product coke production in China [J]. Journal of Cleaner Production, 2016, 112: 1292–1301.
- [28] LI J Y, ZHANG S S, NIE Y, et al. A holistic life cycle evaluation of coking production covering coke oven gas purification process based on the subdivision method [J]. Journal of Cleaner Production, 2020, 248: 119183.
- [29] KANG D, HAN J. Environmental analysis of methanol production from coke oven gas [J]. International Journal of Environmental Science and Technology, 2022, 19(7): 5849–5856.
- [30] CHEN Z, SHEN Q, SUN N N, et al. Life cycle assessment of typical methanol production routes: The environmental impacts analysis and power optimization [J]. Journal of Cleaner Production, 2019, 220: 408–416.
- [31] YAO Y, CHANG Y, HUANG R Z, et al. Environmental implications of the methanol economy in China: Well-to-wheel comparison of energy and environmental emissions for different methanol fuel production pathways [J]. Journal of Cleaner Production, 2018, 172: 1381–1390.
- [32] LI J Y, ZHANG Z Z, ZHANG S S, et al. Life cycle assessment of liquefied natural gas production from coke oven gas in China [J]. Journal of Cleaner Production, 2021, 329: 129609.
- [33] WANG Q, XUE M Q, LIN B L, et al. Well-to-wheel analysis of energy consumption, greenhouse gas and air pollutants emissions of hydrogen fuel cell vehicle in China [J]. Journal of Cleaner Production, 2020, 275: 123061.
- [34] BURMISTRZ P, CZEPIRSKI L, GAZDA-GRZYWACZ M. Carbon dioxide emission in hydrogen production technology from coke oven gas with life cycle approach [J]. E3S Web of Conferences, 2016, 10: 00023.
- [35] LI J Y, MA L F, QU P X, et al. Comparative life cycle assessment of ammonia production by coke oven gas via single and coproduction processes [J]. Science of the Total Environment, 2023, 882: 163638.
- [36] REN K, ZHANG T Z, BAI Y Y, et al. Environmental and economical assessment of high-value utilization routes for coke oven gas in China [J]. Journal of Cleaner Production, 2022, 353: 131668.
- [37] LIU H, GUO W. Comparative study on life cycle energy consumption, carbon emissions and economic performance of various coke-oven gas utilization schemes [J]. Fuel, 2023, 332: 125706.
- [38] 赵雅思. 焦化废水处理过程中固相物质的产生及其处置生命周期3E评价[D]. 广州: 华南理工大学, 2020.
- [39] ZHANG D, ZHAO H, GAO W F, et al. The significance of resource recycling for coking wastewater treatment: Based on environmental and economic life cycle assessment [J]. Green Chemical Engineering, 2022. DOI: 10.1016/j.gce.2022.08.005.
- [40] ZHOU H T, WEI C H, ZHANG F Z, et al. Energy-saving optimization of coking wastewater treated by aerobic biotreatment integrating two-stage activated carbon adsorption [J]. Journal of Cleaner Production, 2018, 175: 467–476.
- [41] 纪振宇. 基于生命周期评价的煤化工废水处理全过程节能减排研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2021.
- [42] MURALIKRISHNA I V, MANICKAM V. Environmental Management [M]. Oxford: Butterworth Heinemann. Elsevier Ltd, 2017: 57–75.
- [43] GARCÍA S G, MONTEQUÍN V R, FERNÁNDEZ R L, et al. Evaluation of the synergies in cogeneration with steel waste gases based on Life Cycle Assessment: A combined coke oven and steelmaking gas case study [J]. Journal of Cleaner Production, 2019, 217: 576–583.
- [44] SCHRIJVERS D L, LOUBET P, SONNEMANN G. Developing a systematic framework for consistent allocation in LCA [J]. The International Journal of Life Cycle Assessment, 2016, 21(7): 976–993.
- [45] CRUZ P L, IRIBARREN D, DUFOUR J. Modeling, simulation and life-cycle assessment of the use of bio-oil and char in conventional refineries [J]. Biofuels, Bioproducts and Biorefining, 2020, 14(1): 30–42.
- [46] 黄娜, 王洪涛, 范辞冬, 等. 基于不确定度和敏感度分析的LCA数据质量评估与控制方法[J]. 环境科学学报, 2012, 32(6): 1529–1536.
- [47] ZHOU X Y, CHENG Z Y, REN K, et al. Environmental sustainability improvement in chloromethanes production based on life cycle assessment [J]. Sustainable Production and Consumption, 2022, 34: 105–113.
- [48] RYOO S G, JUNG H S, KIM M, et al. Bridge to zero-emission: Life cycle assessment of CO₂-methanol conversion process and energy optimization [J]. Energy, 2021, 229: 120626.

[责任编辑 张香]

(下转第15页)

Catalytic hydrogenation of CO_2 to aromatics by tandem catalysts of different crystalline In_2O_3 /sheet HZSM-5

JIAO Chunxue, ZHA Fei, TIAN Haifeng*

(School of Chemistry and Chemical Engineering, Northwest Normal University, Lanzhou 730070, China)

Abstract: In_2O_3 with different crystalline forms (cubic phase, hexagonal phase and mixed crystalline phase) was prepared by hydrothermal/solventothermal method. The In_2O_3 /sheet HZSM-5 tandem catalysts for CO_2 hydrogenation to aromatics was prepared by mechanically mixing with different crystalline forms In_2O_3 and sheet HZSM-5 zeolite, and its catalytic activity was tested on a fixed-bed reactor. The effect of spatial distribution of the two active components on their catalytic performance was studied. The structure, morphology and surface acidity properties of the catalysts were characterized by XRD, SEM, N_2 isothermal adsorption/desorption and Py-IR. The experimental results showed that when the active sites of In_2O_3 metal oxide and the sheet HZSM-5 zeolite were too close to each other, the acidity of HZSM-5 zeolite was poisoned due to the migration of In species from In_2O_3 metal oxide into the zeolite, resulting in the inefficient conversion of the reaction intermediate (methanol) to aromatics. Therefore, the conversion of CO_2 and selectivity of aromatic were reduced.

Key words: In_2O_3 ; sheet HZSM-5 zeolites; tandem catalyst; CO_2 hydrogenation to aromatics



(上接第 7 页)

Application and research progress of life cycle assessment in coking industry

SHI Fan, LI Jingying*, ZHANG Suisui, QU Peixi,
TANG Tuantuan, XU Long, MA Xiaoxun

(School of Chemical Engineering, Northwest University; International Scientific and Technological Cooperation Base of the Ministry of Science and Technology (MOST) for Clean Utilization of Hydrocarbon Resources, Xi'an 710069, China)

Abstract: Coking industry, as a traditional coal chemical industry in China, is still faced with problems such as high energy consumption, pollutants and overcapacity. Life cycle assessment (LCA) is a systematic environmental impact assessment method and management tool for assessing the environmental impact of products and processes over the entire product life cycle, which has been widely used in various fields by providing a systematic theoretical guidance and decision-making for the green and sustainable development of coking industry. The theory and framework of LCA are introduced and the articles in coking industry are analyzed. The application and research advancement of LCA in the coking industry such as coking production, downstream utilization and coking wastewater are reviewed in this study. The primary issues of LCA in coking industry are discussed from four dimensions (i.e., goal and scope definition, inventory data acquisition, impact assessment method, impact categories, and interpretation), including: the assumptions on system boundaries and details are not clearly defined; the allocation method remains unclear; data sources and quality are inconsistent; LCIA methods are not uniform; local LCI database is lacking, and the findings are not clearly interpreted. Finally, in order to solve the urgent problems of LCA in coking industry, some suggestions are proposed such as clarifying system boundaries, establishing a comprehensive local inventory database, selecting the correct allocation method, and diversifying evaluation indexes.

Key words: coking industry; life cycle assessment; greenhouse gas; energy consumption; sustainability