

面向环境影响的水泥生命周期评价理论及展望

朱磊¹, 苏强¹, 晏任斯¹, 刘卓霖², 任兵建², 陶从喜³, 郭晓璐^{4,5}

(1. 同济大学 经济与管理学院, 上海 201800; 2. 华润水泥技术研发有限公司, 广东 广州 510460; 3. 华润水泥技术研发(广西)有限公司, 广西 南宁 530409; 4. 先进土木工程材料教育部重点实验室(同济大学), 上海 201804; 5. 同济大学 材料科学与工程学院, 上海 201804)

摘要: 通过对生命周期评价在水泥生产中的应用研究进行梳理和归纳, 总结当前研究取得的成果、存在的问题以及未来的研究方向。生命周期评价主要包括目标和范围定义、清单分析、影响评价以及结果解释四个阶段。当前研究主要存在数据来源不清晰、排放统计不完善等问题, 建立本土水泥生产数据库、评估数据质量、开发适用于我国国情的生命周期评价软件等是未来值得关注的研究领域。

关键词: 应用; 水泥生产; 环境影响; 生命周期评价

Abstract: Through sorting out and summarizing the application research of LCA in cement production, the current research achievements, existing problems and future research direction are summarized. LCA mainly includes four stages: goal and scope definition, life cycle inventory analysis, life cycle impact assessment and interpretation. The current researches are weak in data collection, emissions statistics and other problems. The establishment of local cement production database, evaluation of data quality and development of LCA software suitable for China's national conditions are worthy of attention in the future research fields.

Key words: application; cement production; environmental impact; life cycle assessment

First author's address: School of Economics and Management, Tongji University, Shanghai 201800, China

中图分类号: X32; C94; TQ172 文献标志码: A 文章编号: 1002-9877(2023)05-0016-07 DOI: 10.13739/j.cnki.cn11-1899/tq.2023.05.004

0 引言

生命周期评价(Life Cycle Assessment, LCA)的概念是在1990年国际环境毒理学与化学学会(SETAC)上提出的, 其核心思想可简单归纳为: 对产品的整个生命周期, 即原材料获取、生产加工、维护使用和最后处置等过程, 进行定量计算, 评价该产品实际或潜在的环境负荷, 寻求改善环境影响的机会^[1]。LCA具有较强的整体性、层次性以及环境适应性等特点, 可以系统性地评估原料和能源的使用效率, 识别阶段间的污染转移, 从而为后续工艺的改进提供参考^[2]。

作为一种可持续的环境影响评价工具, LCA自提出以来, 被广泛应用于产品开发和设计、工艺完善及改进、环境管理与审计、市场营销等多个领域, 积累了一定的研究成果。部分学者对相关研究进行评述, 主要集中在以下两个方面:

(1) 对LCA理论框架、发展过程以及具体内容的综述。孙启宏等^[3]对早期国外LCA的研究进行梳理, 详细阐述LCA的产生和发展, 给出LCA的定义和类型, 同时介绍了不同国际机构在推进LCA方面做出

的努力。郑秀君等^[1]进一步整理了1995年以来国内LCA的大部分文献, 从环境影响评价方法、清单分析和LCA数据库、应用领域三个方面进行综述, 同时整理了LCA发展历程以及当前研究进展。

(2) 对LCA在具体领域应用的综述。章毅等^[4]简要介绍了LCA的组成与框架, 并对LCA在道路和路面中的应用进行回顾, 指出道路LCA的重点及难点。罗小勇等^[5]在介绍LCA理论的同时分析其在污水处理领域的应用理论, 回顾性评述了污水LCA在国内外的应用现状和特点, 并对其在该领域的发展进行展望。Yoshida等^[6]对已发表的35篇关于污泥LCA的文章进行梳理, 识别各项研究的目标和范围。Muteri等^[7]总结和更新了不同类型并网光伏的LCA文献, 分析第一代光伏技术(传统硅基)到第三代(创新非硅基)生命周期中产生的能源和环境影响, 为未来的分析提供信息和比较基准。

在水泥生产领域, 有学者借助LCA理论评估水泥生产带来的环境影响, 辨识生产过程环境热点, 从而改善工艺进一步提高整体环境效益。目前, 已有部分学者对LCA在水泥领域的研究进行综述, 梳理

基金项目: 国家重点研发计划项目(2021YFB3802001)

其在水泥生产过程中的应用情况。例如, Salas等^[8]从水泥的环境影响、LCA方法以及改善措施三个方面,总结了近年国外在水泥制品生产和使用阶段环境性能的研究进展。Ige等^[9]则着重梳理了以“摇篮到大门”为系统边界的水泥LCA的文章,关注各项研究在LCA框架的差异,如:功能单位、数据来源以及数据质量评估。然而,上述研究仅局限于英文研究,忽略了中国学者在水泥LCA领域的贡献。此外,本文重点回顾了近年来新发表的文献,依据水泥LCA基本框架梳理其在水泥生产中的应用情况。本文拟简要介绍LCA的起源及其发展,对其在水泥生产领域中的应用现状进行综述,总结水泥LCA研究存在的不足及未来的发展方向,帮助学界把握水泥LCA的研究进展。

1 LCA起源和发展

LCA早期被称为资源与环境状况分析(REPA),最早可追溯至20世纪60年代末^[10]。1969年,美国可口可乐公司针对不同饮料包装品的资源消耗和环境负荷进行评估,最终采用塑料瓶代替可回收玻璃瓶。该事件成为LCA研究开始的标志。随后,欧洲、日本的研究机构针对其他包装品也先后开展了一系列研究,该时期的REPA主要采用能源分析方法。

70年代到80年代中期,固体废弃物的处理成为全球性问题。美国和欧洲的研究机构基于REPA的思想,发展了废弃物管理的方法论,对环境排放和资源消耗的潜在影响进行深入研究,随后LCA的研究进入快车道。环境报告制度的实行以及环境影响评价技术的更新为LCA的发展和应用奠定了基础。

1990年, SETAC首次主持召开了有关LCA的国际研讨会。在SETAC以及欧洲生命周期评价开发促进会(SPOLD)的大力推动下, LCA在世界范围内得到较为广泛的应用。1991年, PER公司开发了著名的LCA软件—— Simapro, 该软件嵌入了多种影响评估方法。1992年, SPOLD基于欧洲二十家主要企业LCA论坛, 开发了数据库。1993年, SETAC对学术会议进行总结, 出版《生命周期评价(LCA)纲要: 实用指南》, 该报告的出版开启了LCA标准化操作。目前, SETAC与ISO积极推进LCA方法论的标准化进程。1997年, ISO制定并发布了ISO 14040标准, 将LCA分解为目标和范围定义、清单分析、影响评价以及结果解释四个部分。该标准迅速得到了主流学术界的认可, 为后续LCA研究的开展奠定了基本框架。

西欧以及美国等发达国家通过积极实施项目应用以及召开研讨会等措施, 推进LCA的研究与发展。

日本与韩国也相继建立了本国的LCA学会, 开发本土数据库, 对绿色产品进行统一认证。在政策支持和市场推动下, 我国的LCA研究与应用正处于蓬勃发展阶段。2012年工信部、科技部、财政部《关于加强工业节能减排先进适用技术遴选、评估与推广工作的通知》、2013年工信部、发改委、环保部《关于开展工业产品生态设计的指导意见》, 均推荐使用LCA进行环境影响评估。

2 水泥生产企业LCA理论框架

LCA作为一种有效的环境管理工具, 评估产品在整个生命周期中对环境造成的实际或潜在影响。该方法同样也适用于水泥生产, 帮助企业和学者辨识水泥生产中造成环境负荷的关键环节, 从而改进生产工艺, 指导节能减排。为厘清LCA在水泥生产领域中的相关研究, 本文的检索策略同时包括了英文和中文的文献检索。在此基础上, 笔者通过阅读检索文献的标题以及摘要进行筛选与分类。由于LCA在水泥生产领域的切入点不同, 本文选取了其中具有代表性的文献(通过期刊质量和被引用次数衡量)以及最新的文献。经文献梳理以及主题归纳可知, LCA在水泥生产中的应用研究主要集中在替代原料(燃料)的使用、废弃物协同处置、新旧工艺的对比以及各国水泥行业情况调研等。

依据1997年发布的ISO 14040标准, LCA主要包括四个阶段: 目标和范围定义、清单分析、影响评价以及结果解释, 其框架如图1所示。本文将围绕上述阶段进行展开, 对水泥LCA文献进行梳理。

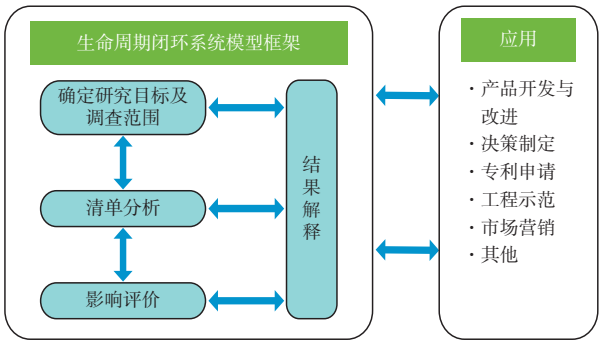


图1 生命周期评价理论框架

2.1 目标和调查范围设定

作为LCA研究的第一步, 目标及调查范围的设定(goal and scope definition)为评价工作的开展指明了方向。该部分是整个评价过程的立足点, 关系到后续流程的进行并决定了LCA的评价结论。目标设定主要阐述使用LCA的具体原因和应用意图, 范围界定则包括选定功能单位、确定系统边界等。

具体到水泥生产企业,研究目标包括:识别水泥各生产阶段的环境因素,辨识环境热点和影响环境的主要类别,为LCA数据库提供数据支持,进一步推动水泥行业的可持续发展等^[11]。随着新工艺和替代原料的不断出现,当前对于水泥LCA的研究多集中于新旧工艺对环境影响的对比。例如,为探究新工艺对磷石膏分解制水泥熟料的影响,张杭等^[12]利用LCA评估各生产阶段的能耗与环境负荷,结果表明,新工艺较传统方法显著降低环境负荷。姜睿等^[13]采用LCA建立了五种典型水泥生产工艺的生命周期模型,对比各工艺在水泥生命周期中主要环境影响类别的差异,找出大型新型干法相比其他工艺的优势与不足。为评估活性氧化镁对水泥行业可持续发展的贡献,Ruan等^[14]分析了活性MgO生产的环境影响,并将其与传统波特兰水泥进行比较,验证该材料生产的整体可持续性。

此外,由于各国生产环境不同,当前LCA在水泥行业的应用研究呈现出较强的地域性。因此,立足当地水泥生产企业分析各阶段环境影响成为一种研究趋势。例如,Ali等^[15]通过现场调研以及Simapro软件,对埃及水泥厂、瑞士水泥厂、埃及规划工厂在不同策略下的环境影响进行比较生命周期评估,辨识当前埃及水泥行业与国际先进技术的差距。Stafford等^[16]以巴西水泥行业为研究对象,分析水泥生产各阶段对环境的影响,结果表明在该案例中,交通运输对环境的影响是最大的,其次才是水泥熟料的煅烧。Tun等^[17]则以缅甸水泥行业为研究对象,评估缅甸水泥行业对当地环境的影响,并确定影响环境的主要类别,结果表明,气候变化、光化学污染、细颗粒污染在缅甸水泥工业的环境影响中占比最大。

为确保LCA结果的可比性,选定合适的功能单位十分必要。Jose-Luis等^[18]分别采用1 t水泥和1 t废弃物为功能单位探究了水泥窑协同处置废弃物对环境的影响,并重点关注生命周期清单中的碳排放、主要能源和空气排放物。姜得义等^[19]以1 kg P·O 42.5水泥为功能单位,针对北京琉璃河水泥厂进行分析评价并给出结果解释,建议企业可以提高替代原料使用率,通过余热回收等途径进一步降低环境负荷。Georgiopoulou等^[20]选取1 t水泥熟料为功能单位,评估垃圾衍生燃料、轮胎衍生燃料、生物污泥等7种替代燃料对比传统燃料的环境影响,结果表明,垃圾衍生燃料的环境友好性最高,生物污泥的环境负荷最大。Putra等^[21]则选取100 t水泥作为功能单位,对印尼西部的三家水泥生产厂进行社会影响和环境影

响的评估,最后采用AHP选择可持续性最高的企业。综上可知,功能单位作为所分析系统产品的量度,为输入及输出提供参照标准,从而衡量所有的环境影响。由于其对评价结果有显著影响,因此需要根据调查目标慎重选择。

鉴于水泥的生产应用涉及多个阶段,研究内容的差异会导致系统边界的不同,其范围主要包括:原材料开采、材料加工、熟料生产、水泥生产、运输、施工建造、运营、报废拆除等,如图2所示。根据所研究范围的不同,目前生命周期理论在水泥方面的研究可大致分为两类。

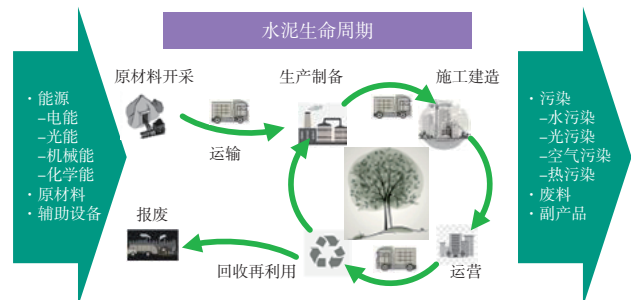


图2 水泥生命周期示意

1) 从摇篮到坟墓

该类方法主要用于评估混凝土的全生命周期,从原材料的开采到水泥的生产制备,再到建筑的运营以及最后的报废回收。Seto等^[22]基于4种粉煤灰分配场景,建立了粉煤灰作为替代原料的混凝土全生命周期评估模型并进行综合比较。Tosti等^[23]对生物质飞灰作为二次胶凝材料在水泥砂浆中的再利用进行了生命周期评估,并将其与传统的填埋方案进行对比,从而得出该方案的可行性。特别是比较不同的混凝土成分时,由于强度、耐久性以及使用寿命的差异,建议采用“从摇篮到坟墓”或改进型的“从摇篮到大门”作为系统边界。

2) 从摇篮到大门

由于水泥用途的多样性和复杂性,其在出厂后很难密切追踪。基于这一现实约束,目前水泥LCA的系统边界多采用“从摇篮到大门”^[9]。早在1998年,刘顺妮等^[24]就对LCA应用于水泥工业进行初步尝试,通过标准化环境影响指标以及AHP权重定量法对硅酸盐水泥进行较为系统的LCA评价。崔素萍等^[11]对水泥生产全过程的环境负荷进行定量分析,辨识生产过程环境热点,建立水泥材料生命周期基础数据库并开发相应软件。

与国内研究情况类似,国外对于水泥LCA的研究也多集中于“从摇篮到大门”^[9]。为减少数据不确

定性, Huntzinger等^[25]采用从摇篮到大门的LCA方案衡量传统工艺与替代工艺对环境的影响,发现水泥窑粉尘回收对环境节约的影响甚微。Meshram等^[26]则以印度市场为研究背景,对粉煤灰和矿渣混合生产的两种土壤聚合物水泥进行了生命周期评估,指出该类水泥较传统水泥的优越性。

由前述可知,当前对于水泥LCA的研究多集中于不同国家或不同工艺间的对比。因此,研究者需要根据研究目标确定合适的功能单位以及系统边界,表1给出了几篇典型水泥LCA文章的具体信息。由于LCA的重复性,在数据和信息的收集过程中需要根据研究目标不断调整和修正调查范围。

表1 不同水泥LCA研究对比

文献	国家	研究目标	功能单位	范围
张杭等 ^[12]	中国	对比不同分解工艺下磷石膏分解制水泥熟料的环境影响	1 kg水泥熟料	熟料煅烧
姜睿等 ^[13]	中国	对中国水泥工业进行生命周期评价,提供数据库基础数据	1 t水泥	原材料开采到水泥的生产与销售
Ruan等 ^[14]	新加坡	评估活性MgO水泥生产对环境的影响并与传统水泥进行对比	1 t水泥	原材料开采到水泥包装
Ali等 ^[15]	埃及、瑞士	对比埃及传统水泥生产工艺以及在建工艺与瑞士的差距	1 kg水泥	原材料开采到水泥包装
Stafford等 ^[16]	巴西	调查巴西水泥工业对环境的影响	1 t波特兰水泥	原材料开采到水泥生产
Tun等 ^[17]	缅甸	评估缅甸水泥行业的环境影响,确定主要影响类型	1 t波特兰水泥	原材料开采到水泥生产
Seto等 ^[22]	加拿大	对比不同粉煤灰掺比水泥的环境影响	1 m ³ 混凝土所用水泥	原材料开采到水泥报废
宋晓玲等 ^[27]	中国	全废渣制水泥工艺与传统工艺的环境影响对比	1 t水泥	原材料开采到水泥生产
Navia等 ^[28]	智利	添加火山土壤作为替代原料与传统工艺的环境影响对比	1 t水泥熟料	从原料开采到熟料生产

2.2 清单分析

清单分析(Life Cycle Inventory Analysis, LCI)是目前LCA中发展最为完善的阶段。作为LCA的基础, LCI是对资源投入和环境输出等数据进行客观量化的过程,贯穿产品的整个生命周期。该部分数据主要来源于水泥工厂、环境产品声明以及LCA数据库等。数据的选择取决于研究范围,其中,输入内容包括资源和能源的消耗以及运输数据,环境输出则包括废气、废水和固体废弃物。对于水泥LCA的研究根据输入数据的不同,大致可分为两类,一类仅包括原材料的运输过程^[29],另一类则进一步考虑原材料开采所需能耗^[11, 16]。

随着研究的不断深入,替代原料被广泛应用于水泥生产,采用LCA评估替代原料的环境负荷成为研究热点。目前,常用的替代原料有:粉煤灰、矿渣、陶瓷废料、氧化铝、火山灰等。为比较不同国家以及本土垃圾填埋场产生的粉煤灰作为替代原料在水泥生产中的环境影响, Hafez等^[30]采用从大门到摇篮的LCA方法,混合使用直接和间接数据对上述方案进行建模和评估。

水泥生产过程使用的能源可分为热能和电能两种。其中,热能主要用于熟料煅烧,该阶段对环境影响占比最大。常用的化石燃料包括煤、石油焦、天然气、焦炉气、重油等。此外,水泥厂还大量使用废旧

轮胎、废物衍生燃料、脱水污泥、生物质燃料、固液废弃物等作为替代燃料^[9]。例如,刘娜等^[31]将预处理过的低品质包装废料作为替代燃料,焚烧后的废渣作为水泥原料开展试烧实验并进行评价,协同处置低品质包装废料将进一步降低环境影响潜值。Güereca等^[32]则采用墨西哥废物管理系统和水泥工业的真实数据,设计了一种比较LCA方案评估传统燃料和混合城市固废衍生燃料对熟料生产的环境负荷,验证了替代燃料的有效性。此外, Ayer等^[33]运用LCA量化加拿大一家使用森林残留物作为生物质燃料给水泥厂带来的潜在环境效益,结果表明,该工艺下的温室气体排放减少了50%。基于上述研究, Holt等^[34]以美国水泥生产为背景,评估液体危险废物作为替代燃料带来的环境影响。

综上,使用替代原料和替代燃料进一步降低水泥生产的环境负荷,提高废物利用率成为当前的研究热点,由于水泥厂周边环境的不同,研究者需要因地制宜,选择合适的替代原料及替代燃料,降低运输过程带来的环境影响,同时减少替代原料(燃料)的环境处理成本。清单分析是一个反复迭代的过程,需要对数据内容进行详尽的收集和修改以适应研究目的。

2.3 影响评价

生命周期影响评价(Life Cycle Impact Assessment, LCIA)是以LCI为基础,确定各种环境

问题造成的潜在影响程度,包括:生态系统、人体健康以及其他。作为LCA的核心部分,LCIA实施困难,目前尚处于概念阶段,学术界对该方法的内容还没有达成共识。

现有文献一般把LCIA分解为一个“四步走”模型,即分类化(classification)、标准化(normalization)、特征化(characterization)以及加权(weighing)。针对水泥LCA的研究,常用的影响评价方法有:Centre of Environmental Science (CML 2001), Eco-indicator 99, Environmental Design of Industrial Products 1997, 2003 (EDIP 97, EDIP 2003), Ecological Scarcity 1997, IMPACT 2002+, IPCC 2001, RECIPE 等。当前,LCIA方法大致可分为问题比较型和危害计算型两种,郑秀君等^[1]对两类方法的特征进行整理,并从项目数、透明度、价值判断范围等方面综合对比。表2列举了几种针对水泥生产常用的影响评价方法。

表2 常用评价方法的影响类型

评价方法	CML 2001	Eco- indicator 99	RECIPE	IPCC (100y)	IMPACT 2002+
影响类型					
全球变暖潜质	√	√	√	√	√
富营养化	√	√	√	√	√
非生物损耗	√			√	
酸化	√	√	√		√
臭氧消耗		√	√		√
生态毒性(水体)		√	√		√
光化学污染	√		√		
生态毒性(土壤)		√	√		√
累计(火用)需求				√	
电离辐射		√	√		√
可吸入颗粒物形成			√		
呼吸系统的影响		√			√
人体毒性			√	√	√
土地使用		√	√		√
矿物开采		√			√
资源耗竭			√		
化石燃料		√			√

刘娜等^[31]采用SimaPro 7.1作为LCA评估软件,利用Eco-indicator 99,对比常规生产方案和协同处置低品质包装废料两种水泥生产过程的环境影响,结果表明,新工艺的环境影响潜值明显降低。基于工厂实际数据以及现有数据库,结合RECIPE 2016方法,宋晓玲等^[27]在包括温室效应、酸化效应、土地利用等17个小类,人体健康影响、生态系统影响以及资源消耗三个大类对水泥工艺造成的环境影响进行评价。

由上述可知,尽管对于特征化方法的研究很多,但是依然缺乏一致认可的方法进行影响评价。即使采用相同的清单数据,不同的影响评价方法可能会导致不同的影响评价结果。因此,研究者需要根据研究的目的和准则,使用合适的影响评价方法选择并计算产品及其生产过程中的影响类别。

2.4 结果解释

作为LCA的最后阶段,结果解释(Interpretation)是对清单分析和影响评价的结果进行总结归纳,形成结论和建议以进一步减少环境负荷。由前述可知,调查范围以及影响评价方法的不同会影响最后结论,因此有必要对结果进行解释。此外,研究者还需对数据的完整性以及代表性等数据质量进行评价。

宋晓玲等^[27]对使用全工业固废原料制作水泥产生的环境影响进行评价,与传统生产方案相比,该工艺在资源能源消耗以及碳排放上呈明显下降趋势。他们建议合理减少熟料煅烧阶段的煤炭使用,降低全过程的用电量,并缩短原材料的陆运距离。Li等^[35]对中国水泥行业进行详细的生命周期评估,并与日本水泥工业进行对比,结果表明,中国水泥工业仅在温室效应方面具有优势,而酸化效应、富营养化、光化学烟雾以及人体毒性等指标则落后于日本水泥。因此,他们建议考虑余热回收技术,并使用替代燃料(原料)以及脱硫除尘技术减少环境负荷。Hossain等^[36]利用LCA技术评估在香港生产不同类型水泥的能源消耗及其对全球变暖的潜在影响。他们建议采用玻璃粉作为部分原材料,同时利用当地产生的木材废料作为替代燃料等策略,结果表明废弃物的使用可以减少香港水泥工业12%的温室气体排放以及15%的能源消耗。

随着研究的不断推进,LCA被用于评估水泥行业未来发展规划。Palermo等^[37]采用ReCiPe 2016对常规水泥生产工艺以及巴西碳减排部门规划的三个2030远期方案进行评估,从生命周期的角度对决策方案进行论证补充,为规划的改进提供理论支持。Gomes等^[38]采用LCA评估2050年巴西水泥工业在不同需求下对环境的影响,研究发现,水泥生产效率的提高会导致反弹效应,不会抵消替代原料(燃料)带来的排放效益。因此,他们建议增加煅烧黏土和石灰石填充物作为熟料部分替代品的比例。

综上,在结果解释部分,研究者需要对前面流程所提供的信息进行识别、量化、检验以及评价,最后得出评估结论,并以此为依据为进一步改善工艺,提高整体环境效益提出意见和建议。

3 LCA在水泥生产领域的发展展望

经过文献梳理可以发现,关于水泥LCA的研究成果较为丰富。从研究目标来看,当前水泥LCA的研究可分为两类:第一类是运用LCA评估国家或者地区的水泥行业情况,为当地水泥行业的发展给出指导意见;第二类是新旧工艺对比(替代原料或燃料、协同处置废弃物),探索新工艺的可行性与环境友好性。

然而,现有研究主要存在以下不足:①由于水泥出厂后,对其用途难以密切追踪,水泥LCA研究的系统边界多采用“从摇篮到大门”,针对水泥全生命周期评估的文献较为匮乏;②数据来源严重影响评估结果,由于数据敏感性,现有研究除使用调研数据外还会选用国外数据库数据,与实际不符;③数据的完整性以及准确性是评估的前提,当前水泥LCA的研究忽略了对数据质量的讨论;④替代原料(燃料)的使用除常规排放物外,还会产生有害气体(二恶英、HCL、多环芳烃等)和重金属(砷、汞、镉、铬等),部分研究排放清单统计不完整;⑤传统的LCA研究仅考虑了水泥行业的环境影响,在实际生产中,水泥厂的经济效益以及社会效益也应纳入考虑范畴;⑥缺乏自主LCA软件,目前使用较多的simaPro、Gabi以及TEAM均是由国外机构开发。

针对上述不足,未来应用LCA评估水泥生产环境影响的研究应注意以下几点:①针对研究目的,选择合适的系统边界,考虑追踪水泥售后的使用情况,对其在建设阶段、使用阶段以及后续的报废回收阶段进行数据收集,建立水泥全生命周期评估模型;②与本土企业合作,多渠道收集并完善水泥生产及排放数据,建立本土数据库;③对收集后数据质量进行整理和评价,包括:完整性检验、一致性检验以及敏感性检验;④衡量替代原料(燃料)以及水泥窑协同处置废弃物,除需考虑常规排放物外,还需进一步考虑有害气体、重金属、固体废弃物以及废水带来的环境影响;⑤水泥LCA不仅要着眼于环境影响,还需进行经济和社会效益评价,经济方面包括燃料费、原料费、电费、设备费以及工资等,社会方面包括就业率、事故率、工资水平、纳税以及公益参与度等;⑥以本土数据库为基础,开发适用于我国国情的LCA软件,进一步推进LCA在水泥生产中的应用。

4 总结

为提升LCA在水泥生产中的评价精度、增强水泥LCA应用的可信度,本文依据LCA框架探讨了其

在水泥生产中的应用现状。首先简要介绍了LCA的核心思想,概述已有的LCA综述以及当前水泥LCA现状;其次对LCA的起源和发展进行回溯,把握LCA行业动态;按照水泥生产企业LCA理论框架,从目的和调查范围设定、清单分析、影响评价、结果解释四个阶段进行分类和归纳;最终,通过回顾已有研究,梳理研究目的及内容,指出当前水泥LCA应用研究的不足,并总结分析该领域未来的研究方向及思路。

参考文献:

- [1] 郑秀君,胡彬.我国生命周期评价(LCA)文献综述及国外最新研究进展[J].科技进步与对策,2013,30(6):155-160.
- [2] 汪波,杨尊森,刘凌云.基于生命周期的绿色产品开发设计及绿色性评价[J].研究与发展管理,2000(5):1-4+16.
- [3] 孙启宏,万年青,范与华.国外生命周期评价(LCA)研究综述[J].世界标准化与质量管理,2000(12):24-25+31.
- [4] 章毅,刘伟杰.路面生命周期生态环境影响评价研究综述[J].中外公路,2013,33(3):348-352.
- [5] 罗小勇,黄希望,王大伟,等.生命周期评价理论及其在污水处理领域的应用综述[J].环境工程,2013,31(4):118-122.
- [6] Yoshida H, Christensen T H, Scheutz C. Life cycle assessment of sewage sludge management: A review[J]. Waste Management & Research, 2013, 31(11): 1083-1101.
- [7] Muteri V, Cellura M, Curto D, et al. Review on Life Cycle Assessment of Solar Photovoltaic Panels[J]. Energies, 2020, 13(1).
- [8] Salas D A, Ramirez A D, Rodriguez C R, et al. Environmental impacts, life cycle assessment and potential improvement measures for cement production: a literature review[J]. Journal of Cleaner Production, 2016, 113: 114-122.
- [9] Ige O E, Olanrewaju O A, Duffy K J, et al. A review of the effectiveness of Life Cycle Assessment for gauging environmental impacts from cement production[J]. Journal of Cleaner Production, 2021, 324.
- [10] 霍李江.生命周期评价(LCA)综述[J].中国包装,2003(1):19-23.
- [11] 崔素萍,李琛.水泥LCA研究与应用进展[J].中国材料进展,2011,30(8):35-41+49.
- [12] 张杭,马丽萍,胡建红,等.不同分解工艺下磷石膏分解制水泥熟料的LCA研究[J].材料导报,2013,27(S1):302-305.
- [13] 姜睿,王洪涛,张浩,等.中国水泥生产工艺的生命周期对比分析及建议[J].环境科学学报,2010,30(11):2361-2368.
- [14] Ruan S, Unluer C. Comparative life cycle assessment of reactive MgO and Portland cement production[J]. Journal of Cleaner Production, 2016, 137: 258-273.
- [15] Ali A A M, Negm A M, Bady M F, et al. Environmental impact assessment of the Egyptian cement industry based on a life-cycle assessment approach: a comparative study between Egyptian and Swiss plants[J]. Clean Technologies and Environmental Policy, 2016, 18(4): 1053-1068.
- [16] Stafford F N, Raupp-Pereira F, Labrincha J A, et al. Life cycle assessment of the production of cement: A Brazilian case study[J]. Journal of Cleaner Production, 2016, 137: 1293-1299.
- [17] Tun T Z, Bonnet S, Gheewala S H. Life cycle assessment of Portland cement production in Myanmar[J]. International Journal of Life Cycle Assessment, 2020, 25(11): 2106-2121.

[18] Galvez-Martos J L, Schoenberger H. An analysis of the use of life cycle assessment for waste co-incineration in cement kilns[J]. Resources Conservation and Recycling, 2014, 86: 118-131.

[19] 姜德义, 苍大强, 关生林, 等. 北京典型水泥企业生产过程环境负荷评价[J]. 武汉理工大学学报, 2008(4): 36-39.

[20] Georgiopoulou M, Lyberatos G. Life cycle assessment of the use of alternative fuels in cement kilns: A case study[J]. Journal of Environmental Management, 2018, 216: 224-234.

[21] 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, 27(23): 29352-29360.

[22] Seto K E, Churchill C J, Panesar D K. Influence of fly ash allocation approaches on the life cycle assessment of cement-based materials[J]. Journal of Cleaner Production, 2017, 157: 65-75.

[23] Tosti L, van Zomeren A, Pels J R, et al. Life cycle assessment of the reuse of fly ash from biomass combustion as secondary cementitious material in cement products[J]. Journal of Cleaner Production, 2020, 245.

[24] 刘顺妮, 林宗寿, 张小伟. 硅酸盐水泥的生命周期评价方法初探[J]. 中国环境科学, 1998(4): 41-45.

[25] Huntzinger D N, Eatmon T D. A life-cycle assessment of Portland cement manufacturing: comparing the traditional process with alternative technologies[J]. Journal of Cleaner Production, 2009, 17(7): 668-675.

[26] Meshram R B, Kumar S. Comparative life cycle assessment (LCA) of geopolymer cement manufacturing with Portland cement in Indian context[J]. International Journal of Environmental Science and Technology.

[27] 宋晓玲, 梁智霖, 罗 维, 等. 全工业固废原料制备水泥工艺的生命周期评价研究[J]. 环境科学学报, 2021, 41(12): 5190-5199.

[28] Navia R, Rivela B, Lorber K E, et al. Recycling contaminated soil as alternative raw material in cement facilities: Life cycle assessment[J]. Resources Conservation and Recycling, 2006, 48(4): 339-356.

[29] 杨惠君, 张 敏, 纪 超. 基于LCA的低强再生碎砖混凝土的环境效益评估[J]. 四川建材, 2021, 47(2): 17-19.

[30] Hafez H, Kurda R, Cheung W M, et al. Comparative life cycle assessment between imported and recovered fly ash for blended cement concrete in the UK[J]. Journal of Cleaner Production, 2020, 244.

[31] 刘 娜, 李 丽, 闫大海, 等. 水泥窑共处置低品质包装废物的生命周期评价[J]. 环境科学研究, 2012, 25(6): 724-730.

[32] Guereca L, Torres N, Juarez-Lopez C R. The co-processing of municipal waste in a cement kiln in Mexico. A life-cycle assessment approach[J]. Journal of Cleaner Production, 2015, 107: 741-748.

[33] Ayer N W, Dias G. Supplying renewable energy for Canadian cement production: Life cycle assessment of bioenergy from forest harvest residues using mobile fast pyrolysis units[J]. Journal of Cleaner Production, 2018, 175: 237-250.

[34] Holt S, Berge N D. Life-cycle assessment of using liquid hazardous waste as an alternative energy source during Portland cement manufacturing: A United States case study[J]. Journal of Cleaner Production, 2018, 195: 1057-1068.

[35] Li C, Cui S P, Nie Z R, et al. The LCA of portland cement production in China[J]. International Journal of Life Cycle Assessment, 2015, 20(1): 117-127.

[36] Hossain M U, Poon C S, Lo I M C, et al. Comparative LCA on using waste materials in the cement industry: A Hong Kong case study[J]. Resources Conservation and Recycling, 2017, 120: 199-208.

[37] Palermo G C, Branco D A C, Fiorini A C O, et al. Comparative life cycle assessment of three 2030 scenarios of the Brazilian cement industry[J]. Environmental Monitoring and Assessment, 2022, 194(3).

[38] Gomes V, Cunha M P, Saade M R M, et al. Consequential life cycle assessment of Brazilian cement industry technology projections for 2050. Graz Univ Technol, 2019[C]// in Sustainable Built Environment D-A-CH Conference (SBE).

(编辑 王新频)

广告

水泥冷却器简介

1.水泥冷却器工作原理

本设备采用间接冷却, 水泥与冷却水之间不发生直接接触。水泥从位于冷却器下部的进料口进入, 并通过螺旋叶片进行输送提升。由于固定在转子上的螺旋叶片的高速旋转, 使冷却水泥因高速圆周运动被抛向冷却筒体内侧, 并以一定速度逐步上升的螺旋线运动方向输送到出口, 通过冷却器筒壁实现合理的热传导效应, 冷却器筒体被沿着筒体外表面流下的均匀稳定的水幕冷却, 从而实现对水泥的快速冷却。

2.水泥冷却器性能参数表

项目	LQ2560	LQ2870	LQ3275	LQ3683
型号				
生产能力(t/h)	50-70	70-100	100-130	130-160
功率(kW)	55	75	110	132
水泥入机温度(℃)	约120	约120	约120	约120
水泥出机温度(℃)	<65	<65	<65	<65
冷却水水温(℃)	<30	<30	<30	<30
用水量(t/h)	50-80	70-110	100-140	130-180
整机重量(t)	29	36	41	53

敬告客户: 我公司已经有十年以上生产水泥冷却器的经验及业绩, 使用效果非常好!

市场上已发现利用我公司的技术资料和产品图片, 虚假广告宣传, 敬请留意!

黄石市博大天成环保科技有限公司

联系人: 毕诗英(13872131265)

网 址: www.bdtcline.cn

联系电话/传真: 0714-6332596

邮 箱: bdtcline@126.com