

文章编号:1007-9629(2023)06-0660-10

水泥生命周期评价及其低环境负荷研究进展

郭晓璐^{1,2,*}, 李寅雪², 袁淑婷²

(1. 同济大学 先进土木工程材料教育部重点实验室, 上海 201804; 2. 同济大学 材料科学与工程学院, 上海 201804)

摘要:水泥工业是仅次于钢铁的第 2 大碳排放行业, 对实现“双碳”目标影响重大。生命周期评价 (LCA) 可以定量评估水泥生命周期内的环境负荷。阐述了 LCA 方法评估水泥综合环境负荷的研究现状, 系统阐释了该方法的 4 个重要步骤: 目标和范围的确定 (功能单位和系统边界)、清单分析 (输入数据、输出数据、分配方式)、影响评价 (影响分类、特征化、归一化) 及生命周期解释; 综合分析了使用替代性燃料和原料、生产工艺改造、碳捕集技术及发展低碳胶凝材料等低环境负荷措施, 探讨了环境负荷与水泥性能的协同优化; 指出了 LCA 方法的局限性及未来发展方向。

关键词:综合环境负荷; 生命周期评价 (LCA); 水泥; 节能减碳; 协同优化

中图分类号: TU525.9

文献标志码: A

doi:10.3969/j.issn.1007-9629.2023.06.012

Life Cycle Assessment of Cement and Its Research Progress in Low Environmental Load

GUO Xiaolu^{1,2,*}, LI Yinxue², YUAN Shuting²

(1. Key Laboratory of Advanced Civil Engineering Materials of Ministry of Education, Tongji University, Shanghai 201804, China; 2. School of Materials Science and Engineering, Tongji University, Shanghai 201804, China)

Abstract: Cement industry is the largest carbon emission industry next to steel. It has a significant impact on the realization of the “dual carbon” goal. Life cycle assessment (LCA) is a tool for quantitative analysis of environmental load of cement throughout its life cycle. The current status of the research on the use of LCA to evaluate the integrated environmental load of cement was reviewed. Four critical steps of the LCA method were systematically described, including the goal and scope definition (functional unit and system boundary), inventory analysis (input data, output data and allocation method), impact assessment (classification, characterization and normalization) and life cycle interpretation. The improvement measures for low environmental load, such as using alternative fuels and alternative materials, transformation of production process, carbon capture technology and development of low-carbon cementitious materials were comprehensively analyzed. The cooperative optimization of environmental load and cement performance as well as its existing limitations were discussed. The future research direction were proposed.

Key words: integrated environmental load; life cycle assessment (LCA); cement; energy conservation and emission reduction; cooperative optimization

2020 年习近平主席提出: 中国将努力争取 2030 年前 CO₂ 排放量达到峰值, 2060 年前实现碳中和。2022 年《“十四五”现代能源体系规划》明确了在

“十四五”时期, 单位 GDP 的 CO₂ 排放量将在 5 a 内累计下降 18%。目前, 中国水泥产量达到 23.8 亿 t, 碳排放量约为 12.3 亿 t, 占全国总排放量的 13%^[1]。水泥行

收稿日期: 2022-06-21; 修订日期: 2022-09-01

基金项目: “十四五”国家重点研发计划项目 (2021YFB3802001); 国家自然科学基金资助项目 (52178241); 中央高校基本科研业务费专项 (22120220599)

第一作者 (通讯作者): 郭晓璐 (1980—), 女, 山西长治人, 同济大学教授, 博士生导师, 博士。E-mail: guoxiaolu@tongji.edu.cn

业作为资源、能源消耗和温室气体排放较多的工业之一,是中国实现“双碳”目标的关键。

水泥行业不仅资源和能源消耗量高、碳排放量大,其生产过程还会排放 SO_2 、 NO_x 等有害气体及少量重金属,造成多种环境影响。综合环境负荷是一个综合性的核算评价指标,用以定量描述某一产品在其原料开采、生产、使用或废弃再生阶段耗用的自然资源和能源数量,以及其向环境体系排放的各种废弃物总量(气态、固态和液态废弃物的总量)的综评值^[2]。生命周期评价(LCA)可以全面识别和量化评估产品体系在整个生命周期内,所有投入及产出对自然环境、人类健康和资源消耗等方面的综合环境负荷^[3]。

本文综述了LCA方法评估水泥综合环境负荷的研究进展,系统阐释了LCA评价过程和关键参数,探讨了低环境负荷措施及其与水泥性能的协同优化,同时也指出了LCA的局限性及未来发展方向。

1 水泥生命周期评价

根据 ISO 14040: 2006《Environmental management-life cycle assessment-principles and framework》,生命周期评价包括目标和范围的确定(goal and scope definition)、生命周期清单分析(LCI)、生命周期影响评价(LCIA)和生命周期解释(life cycle interpretation)4个重要步骤。

1.1 目标和范围的确定

目标和范围的确定是指根据研究的实际情况确

定研究对象的功能单位及系统边界,该环节是生命周期评价的首要步骤,也是进行后续分析的基础^[3]。水泥LCA的系统边界大多为“从摇篮到大门”^[4-5](见图1),通常包括原料开采和运输、水泥制备(生料预处理、熟料煅烧、水泥粉磨)及相关能源等。近年来,部分企业对水泥生产工艺进行了节能减排改造,余热回收利用技术在水泥生产中应用广泛,利用余热回收发电系统的节电量占水泥生产总用电量的近一半^[6]。原料开采及运输阶段带来的环境负荷相对较低,并且数据不易获取,有研究将其忽略^[7]或简化处理^[8]。

功能单位为系统输入数据与输出数据的“归一化”提供基准^[9],从而直接影响LCA的最终结果,因此应根据研究目的、时间跨度及地域广度等谨慎选取功能单位。表1汇总了水泥LCA研究的功能单位及系统边界。

1.2 生命周期清单分析

生命周期清单分析是对水泥整个生命周期内的各种输入数据和输出数据进行收集、整理和汇总^[3]。其中,输入数据包括原料消耗、能源消耗及运输距离和运输类型等;输出数据包括系统在整个生命周期内向环境体系排放的气态、固态和液态废弃物。

1.2.1 输入数据清单

水泥生产原料主要有石灰石、黏土、石膏及铁粉等,中国生产1 t熟料平均需要1.50~1.69 t原料^[6]。由于水泥生产所需的淡水资源较少,约 $0.165 \text{ m}^3/\text{t}$ ^[6],且

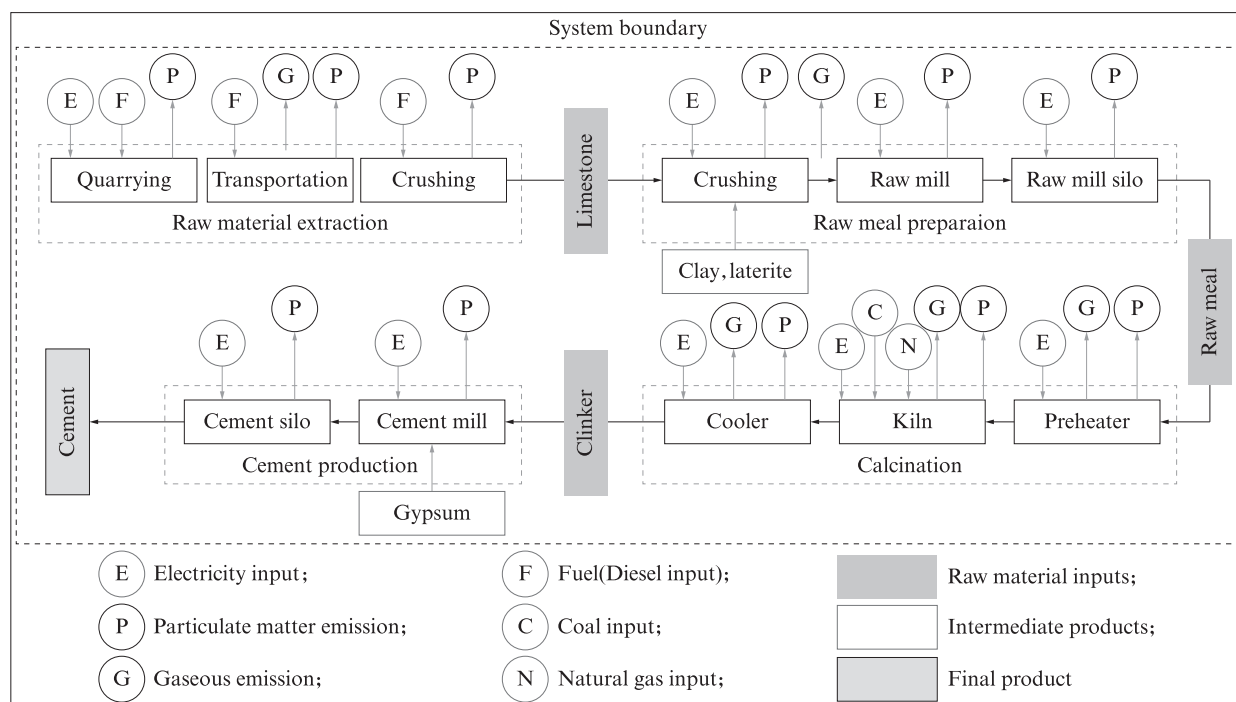


图1 水泥生产的常用系统边界

Fig. 1 Common system boundaries of cement production^[5]

表1 水泥LCA研究的功能单位及系统边界

Table 1 Functional units and system boundaries of cement production from different LCA researches

Functional unit	System boundary							Country	Year	Reference
	Raw material extraction	Transportation	Raw material preparation	Clinker calcination	Cement grinding	Energy production	Waste heat recovery			
1 kg of Portland cement	/	/	✓	✓	✓	✓	/	China	2006	[7]
907 kg of P·O cement	✓	✓	✓	✓	✓	✓	/	USA	2009	[10]
1 kg of cement clinker	✓	✓	✓	✓	/	✓	/	Spain	2012	[11]
1 t of cement with different strength grades	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	China	2017	[12]
1 t of clinker and 1 t of cement	✓	✓	✓	✓	✓	✓	/	Turkey	2019	[13]

回收率为95%~99%，大部分研究未作考虑^[13-15]。

水泥生产过程中使用的能源主要有热能和电能。水泥熟料高温烧成需要大量热能，传统水泥生产主要使用煤、石油、天然气等化石燃料燃烧提供热能。Li等^[6]测得在无停工情况下，生产1 t熟料大约消耗0.128 t的标准煤，用于破碎、粉磨、冷却等过程的总用电量约为21.37 kW·h/t。值得关注的是，2021年12月8日，中央经济工作会议指出“要科学考核，新增可再生能源和原料用能不纳入能源消耗总量控制”。

1.2.2 输出数据清单

水泥生产中排放的污染物大多是气态污染物，主要有CO₂、SO₂、NO_x、颗粒物(PM)，还包括HCl、氟化物、挥发性有机物(VOCs)以及噪声等，同时在水泥生产过程中会产生少量的重金属(Cd、Cr、Hg、Zn、Pb等)排放。

水泥生产过程中CO₂排放可以分为直接排放和间接排放。直接排放的CO₂包括原料分解以及化石燃料燃烧产生的CO₂，而发电及运输过程产生的CO₂为间接排放。水泥生产的碳排放量受熟料系数(熟料与水泥的质量之比)、化石燃料的使用量及电力的消耗量等因素的影响，熟料烧成过程中的碳酸盐分解是水泥行业碳排放的最大来源。中国生产1 t熟料约排放865.8 kg CO₂，占水泥碳排放的92%^[16]。

水泥生产过程中排放的SO₂和NO_x主要源于燃料的燃烧过程，生产1 t熟料的SO₂排放量为0.048~0.150 kg、NO_x排放量为0.900~2.200 kg^[6]。在原料的开采、破碎、粉磨以及熟料煅烧、水泥粉磨等阶段均会产生粉尘及颗粒物，水泥行业的颗粒物排放量约占全国的20%^[17]。其他气态污染物及重金属在水泥生产过程中的排放量通常较小。一些研究表明，替代性燃料和替代性原料的使用会增加重金属的排放^[18]。此外，水泥生产中产生的固体废弃物和废水的数量

均较少，在水泥LCA研究中一般不作考虑。

1.2.3 环境负荷分配方式

为实现水泥行业的可持续性发展，同时解决工业副产品/废弃物的处置及资源化利用，已有多种工业副产品/废弃物作为替代性燃料用于水泥生产，如垃圾衍生燃料^[13,19]、生物质燃料^[20]、废有机溶剂^[21]、废旧轮胎^[22]和废弃塑料^[23]等；而矿渣^[24-25]、粉煤灰^[24-25]、城市污泥^[26]、废旧玻璃^[20]和磷石膏^[27]等可作为水泥生产的替代性原料。不同替代性燃料和替代性原料的减排潜力各不相同，选用时应综合考虑化学组成、运输费用、产品性能等因素。在“双碳”目标驱动下，充分利用低品位石灰石、电石渣、煤矸石、磷石膏等非传统原料的潜在价值，平衡替代性原料利用与水泥性能品质间的矛盾，实现多元原料协同匹配及毒害组分的有效控制，满足水泥低环境负荷和高性能化的双控需求，已成为该领域的研究动向。

目前，是否考虑替代性燃料/原料上游生产过程的环境负荷及其分配比例尚不统一。普遍采用的分配方式包括无分配^[20]、按质量分配^[25]和按经济价值分配^[28]。其中按质量分配所承担的环境负荷往往高于按经济价值分配^[28-29]。

需要指出的是，水泥生产的生命周期清单数据分为背景数据和实景数据^[30]，应对所有数据来源予以详细说明。其中，背景数据是指原料开采、能源生产等基础清单数据，可引自公共数据库(如中国生命周期核心CLCD数据库、欧盟ELCD数据库和瑞士Ecoinvent数据库等)或相关文献资料；实景数据为原料及能源的消耗、污染物的排放等在实际生产过程中通过调研获得的原始数据或由原始数据计算得到的核算数据。

1.3 生命周期影响评价

生命周期影响评价即根据清单分析中的输入数

据和输出数据,对产品整个生命周期中环境负荷的大小和重要性进行定性描述和定量评估^[3].该阶段可分为影响分类、特征化和归一化3个部分.

1.3.1 影响分类

影响分类是定性分析生命周期清单中各项目所涉及到的环境影响类型,将清单项目与环境影响类型建立对应关系.

LCIA 中关于影响分类的模型有终点模型(Eco-indicator99、EPS2000等)和中点模型(CML2001、EDIP2003等)2类.在分析水泥生产时,宜采用中点模型,或2种模型相结合如IMPACT2002+模型^[31],在评价过程中先分析中间影响子类,再归纳到最终损害大类中,其评价过程总体框架可绘制为图2.

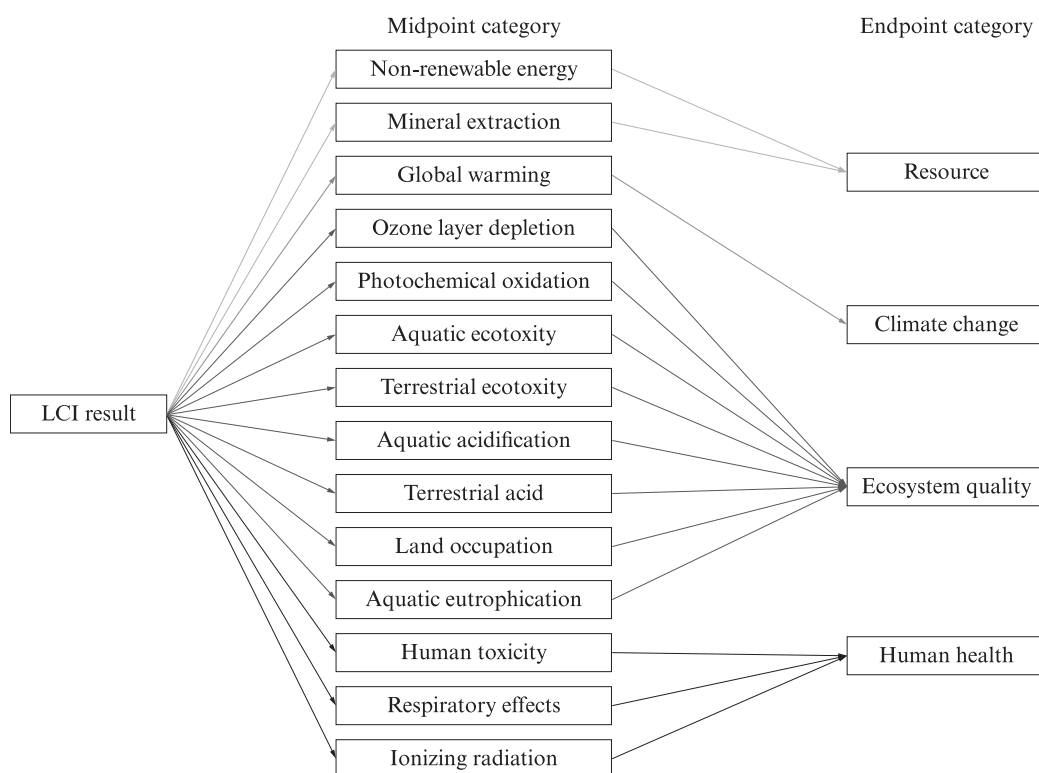


图2 IMPACT2002+模型评价过程的总体框架
Fig. 2 Overall framework of IMPACT2002+ model

需要指出的是,CH₄、SO₂、NO_x等排放物同时涉及了多个不同的环境影响类型,此时应采用分配系数将其适当地划分给多个环境影响类型,以免重复计算,从而放大系统环境的影响.基于排放物的作用机理、排放地点及排放介质,分配机制可分为并联机制和串联机制^[32].

1.3.2 特征化

特征化是在影响分类的基础上,采用特征化因子(c_i)以量化不同清单项目(Q_i)对某一环境类型的影响强度,并将每种环境影响类型的特征化结果汇总成环境负荷当量值(E_x).

表2归纳了CML2001模型中水泥生产通常涉及

表2 CML2001模型中水泥生产涉及的环境影响类型及其特征化当量单位
Table 2 Environmental categories and equivalent units involved in cement production in CML2001 model^[30,33]

Environmental impact category	Inventory item	Equivalent unit
Abiotic depletion potential (ADP)	Limestone, clay, sandstone, iron ore, gypsum, coal, petroleum, natural gas	kg Sb eq.
Global warming potential (GWP)	CO ₂ , CH ₄ , N ₂ O	kg CO ₂ eq.
Acidification potential (AP)	SO ₂ , NO _x	kg SO ₂ eq.
Human toxicity potential (HTP)	SO ₂ , NO _x , PM	kg 1,4-dichlorobenzene eq.
Photochemical oxidation potential (POCP)	SO ₂ , NO _x , CO, CH ₄	kg ethylene eq.
Eutrophication potential (EP)	NO _x	kg PO ₄ ³⁻ eq.
Land use (LU)	Area	m ²

的环境影响类型及其特征化当量或单位^[30,33].中国学者结合中国本土特点与特征化因子的定义和算法,对不可再生资源消耗(ADP)^[34]和土地占用(LU)^[35]的特征化方法进行了本土化修正.某种不可再生资源消耗的特征化因子可通过计算其采储比与所选参考资源(特征化当量)采储比的比值确定^[34].Liu等^[35]综合考虑使用面积、持续时间及土地质量变化等因素,构建了适用于中国本土的土地占用特征化计算方法.

目前,ADP特征化当量的选取尚无统一标准,现有研究中普遍采用金属铟^[18,29,34]作为特征化当量;也有学者采用铁当量^[5]进行计算.崔素萍等^[36]考虑到水

泥消耗的非金属矿产资源远大于金属矿产的特点,提出以硅当量计算.研究表明,采用硅当量计算的不可再生资源的环境负荷当量值比以铁当量换算降低了90%.需要注意的是,选取不同当量会导致研究结果之间难以直接进行比较.

1.3.3 归一化

将水泥LCA计算结构绘制为示意图,见图3.各种环境负荷当量值的单位有所不同,为便于比较其相对大小,需进行归一化处理. E_x 与基准值($E_{x,0}$)的无量纲比值即为归一化结果.其中,归一化基准值可选取特定范围内的总排放量或资源及能源消耗总量,目前大多采用世界范围内的归一化基准值^[34].

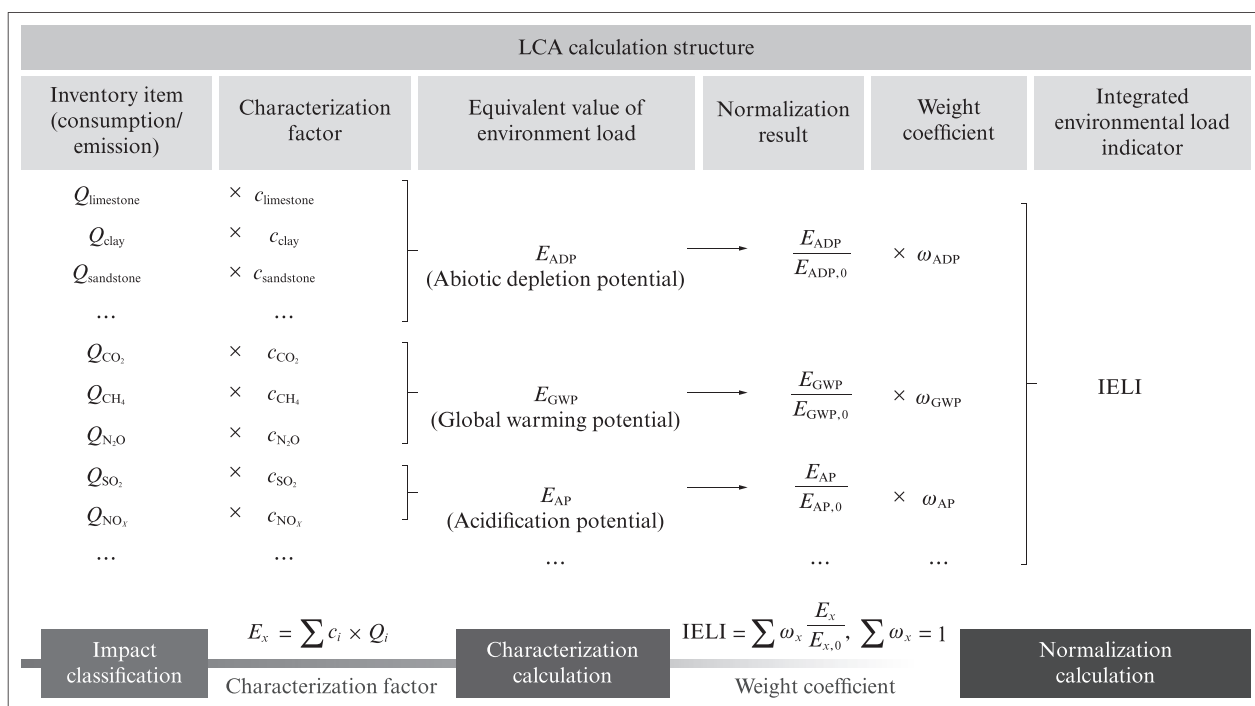


图3 水泥LCA计算结构示意图

Fig. 3 Schematic diagram of the LCA calculation structure of cement

为量化系统的综合环境负荷(IELI),进而实现对不同系统综合环境负荷的比较,可基于各环境影响类型的归一化结果根据其相对重要性赋予相应的权重系数(ω_x),经加权计算后获得一终评,即综合环境负荷值.对于权重系数,国际上尚无统一标准,目前多采用层次分析法(AHP)^[37]加以确定.

归一化可有效降低特征化过程中不同当量的选取对最终计算结果的影响,但无法完全消除采用不同当量计算结果之间的差异.在生命周期影响评价的特征化和归一化过程中,宜选取已普遍采用的特征化当量及特征化因子进行特征化运算后,再与世界范围内的归一化基准值进行归一化处理,并采用

公认的权重系数加权计算,以便于不同研究结果之间的横向比较.

1.4 生命周期解释

LCA方法的最后一个阶段是生命周期解释,即基于前面3个阶段的结果进行总体分析和评估,进而形成结论并提出改进建议^[3].

Thwe等^[5]以缅甸某水泥厂为例,评估了普通硅酸盐水泥生产各个阶段的环境负荷.图4为水泥生产各阶段对环境影响类别的贡献.从图4中可以看出,熟料煅烧是水泥生产中环境负荷最为严重的阶段,该阶段在气候变化、酸化和淡水富营养化中的贡献分别为89%、95%和97%.黎瑶等^[14]发现,水泥生产中发电过程的环境负荷仅次于煅烧阶段,发电过程

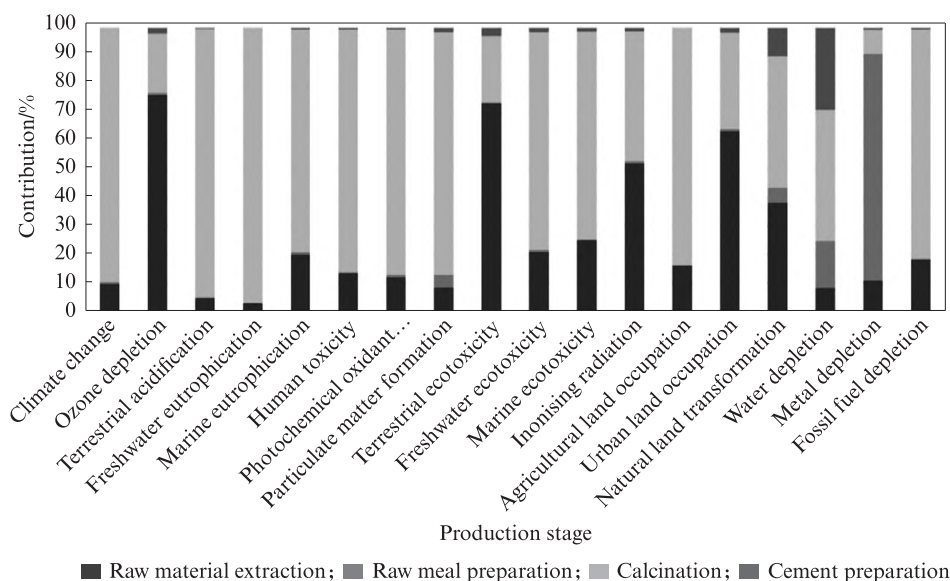


图4 水泥生产各阶段对环境影响类别的贡献

Fig. 4 Contribution of cement production stages on environmental categories^[5]

的影响主要源于燃煤燃烧产生的 SO_2 、 NO_x 等酸性气体及As、Cr等对人体有害的重金属。Feiz等^[38]发现基础设施建设过程的 CO_2 排放量占比不到1%，因此在水泥生命周期评价中排除基础设施建设的影响是合理的。

徐小宁^[39]对比了硅酸盐水泥(P·I)、普通硅酸盐水泥(P·O)、矿渣硅酸盐水泥(P·S)、火山灰质硅酸盐水泥(P·P)、粉煤灰硅酸盐水泥(P·F)和复合硅酸盐水泥(P·C)等6种通用硅酸盐水泥的综合环境负荷。根据文献结果,绘制了不同品种水泥环境负荷的堆积柱状图(见图5)。从图5中可以看出,6种通用硅酸盐水泥对环境最主要的影响均为温室效应,不可再生资源消耗和酸化的影响次之,而富营养化、光化学烟雾和人体健康损害的影响相对较小。

LCA方法的评价过程实质上就是对数据进行处

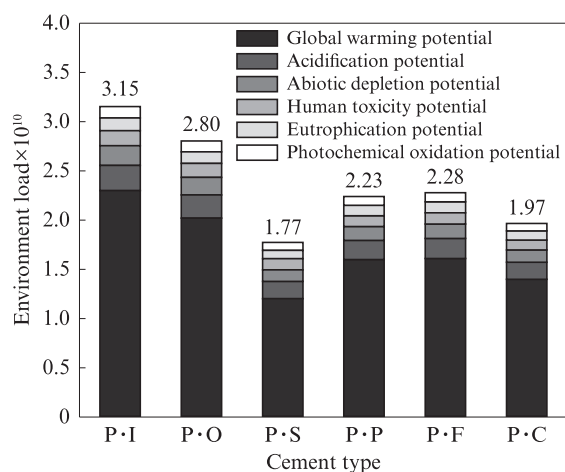


图5 不同品种水泥的综合环境负荷

Fig. 5 Integrated environmental load of different cements

理的过程,初始数据的质量尤为重要。Yang等^[12]分析了清单数据的微小波动对LCA结果的影响;Moretti等^[40]采用LCA方法计算出意大利11家工厂45种配方水泥的环境负荷,并分析了计算结果之间的离散程度。LCA方法评价过程中所做的假设和所涉及的模型/参数也会影响其结果。Chen等^[41]量化了IMPACT 2002+、CML2001等影响评价模型计算结果之间的差异;Seto等^[29]探究了不同加权方案对计算水泥综合环境负荷的影响。综上,LCA的最终结果往往受到数据来源及可靠性、功能单位、系统边界、分配方式、影响评价模型及权重因子等的影响。因此,建议对LCA的计算结果进行完整性、敏感性和一致性三方面的检查与评估。

2 低环境负荷及水泥性能的协同优化

围绕水泥生产的环境影响及来源,探讨了采用替代性燃料/原料、生产工艺技术改造、碳捕集技术及发展低碳胶凝材料等措施的减环境负荷潜能。水泥行业在考虑低环境负荷的同时,需同步兼顾水泥性能和品质,环境负荷与性能指标应耦合评价且协同优化。

2.1 低环境负荷措施

2.1.1 替代性燃料和替代性原料

使用替代性燃料可显著降低水泥生产的环境负荷。Georgiopolou等^[42]对比了生物污泥(BS)、轮胎衍生燃料(TDF)和垃圾衍生燃料(RDF)等3种替代性燃料生产水泥的环境负荷。基于文献^[42]的结果,绘制了使用不同替代性燃料生产水泥环境负荷的雷达图(见图6)。由图6可见,3种替代性燃料均降低了

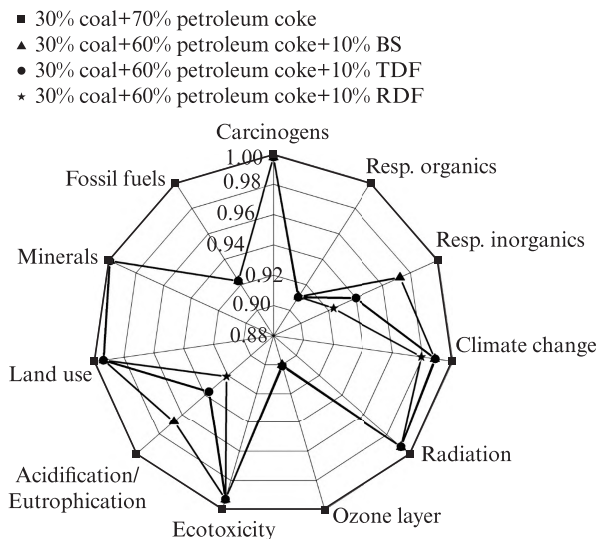


图6 使用不同替代性燃料生产水泥的环境负荷
Fig. 6 Environmental load of cement production using different alternative fuels

水泥生产的环境负荷;BS的燃烧会排放大量 NO_x 和 SO_2 ,因而对酸化及富营养化的影响较大,而RDF是

其中最为环保的选择.

工业副产品/废弃物替代水泥生料原料、石膏及混合材,降低水泥产品中的熟料系数被认为是减少水泥生产环境负荷的有效途径.García-Gusano等^[24]的研究发现,熟料系数从0.8降低到0.7,其温室效应、酸化和淡水富营养化等环境影响可降低10%~13%.

Çankaya和Pekey分析了土耳其某水泥厂同时采用替代性燃料和替代性原料带来的环境效益.2007年燃料的热值替代率为0.09%,原料替代率为0.2%;而2013年该厂燃料热值替代率变为3.5%,原料替代率变为1%.基于文献[13]的数据,汇总了水泥生产环境负荷的变化情况(见图7).由图7可见,除矿物开采外,熟料生产对所有中点类别的影响均有所减少;从4个终点类别来看,人类健康、资源、生态系统质量和气候变化的影响分别减少了27.0%、11.0%、10.0%和1.4%,2013年熟料生产的综合环境负荷较2007年约降低了12%.

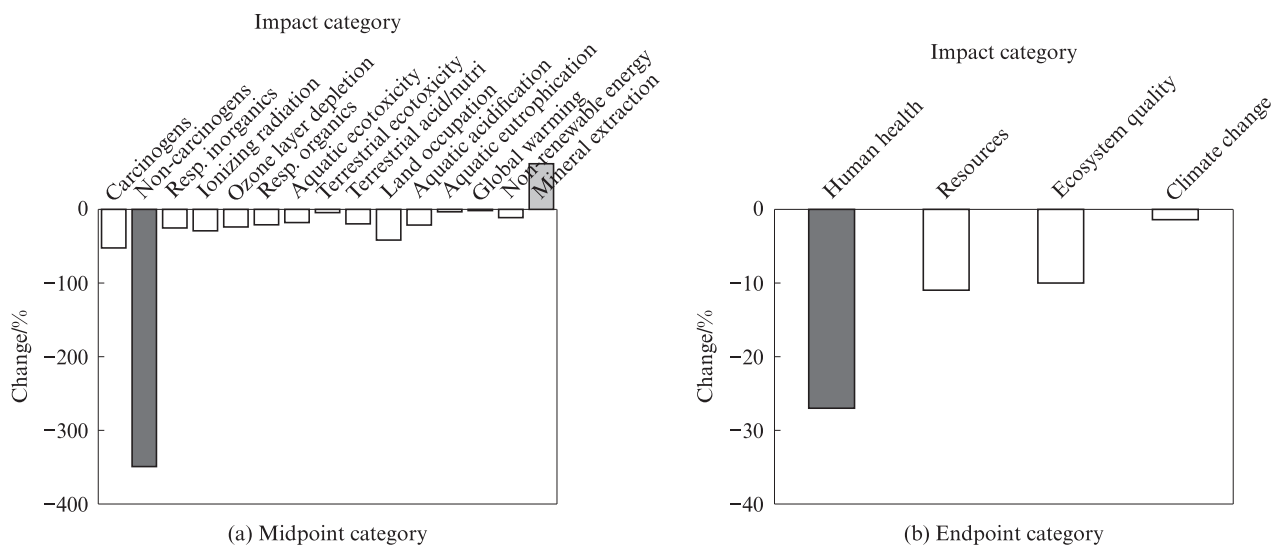


图7 2013年水泥生产环境负荷较2007年的变化
Fig. 7 Environmental load of cement production in 2013 compared with 2007

2.1.2 生产工艺技术改造

生产工艺和生产规模也会影响水泥生产的环境负荷,研究表明^[43-44],采用大型新型干法工艺在能源消耗、温室气体及颗粒物排放等方面的影响明显小于其他工艺.Ammenberg等^[45]指出通过改进水泥工艺技术,增加预分解炉、升级熟料冷却系统以及引入立式辊磨机、升级脱硝系统等,可提高热能和电能的使用效率,减少约5%的 CO_2 排放.碳捕集利用与封存技术(CCUS)可对水泥厂废气中排放的 CO_2 进行有效地分离捕集,García-Gusano等^[46]发现使用单乙醇胺捕集 CO_2 ,可使水泥生产造成的温室效应降低

15%,但该技术需要消耗额外的原料及能源,进而加剧了对酸化、富营养化等类别的影响.

2.1.3 低碳胶凝材料

为减少传统硅酸盐水泥行业的碳排放,国内外学者研制了多种低碳胶凝材料,如低钙水泥、低熟料水泥和碱激发材料等.低钙熟料矿物包括低钙硅酸盐体系(如高贝利特水泥)和非硅酸盐体系(如硫铝酸盐水泥).与普通硅酸盐水泥相比,高贝利特水泥生产的碳排放量平均降低了10%^[47];硫铝酸盐水泥熟料生产对温室效应的影响降低了大约27.7%,但其他环境类别的影响值均有不同程度的升高^[48].活性氧

化镁水泥的煅烧温度低于普通硅酸盐水泥,具有低能耗的优势,但 MgCO_3 分解的碳排放相对更大,且烧失率也较高^[49]。碱激发材料无需高温煅烧,且原料来源广泛, CO_2 排放量较硅酸盐水泥可降低23%~55%^[50],其碳排放也需考虑 NaOH 、水玻璃等碱激发剂的制备过程。

综上,使用替代性燃料/原料可有效降低水泥生产的碳排放,选择替代性燃料时应考虑其S、F等非金属及重金属的含量,替代性原料使用时则应考虑多元原料的匹配及其对水泥品质的影响;水泥生产工艺技术改造一定程度上可减少碳排放,而CCUS目前成本较高且技术亟待成熟;发展低碳胶凝材料亦是水泥行业碳减排的重要方向。

2.2 环境负荷和水泥性能的协同优化与耦合评价

在“双碳”目标的驱动下,发展低环境负荷高性能化胶凝材料将是未来研究重点。目前已有学者开始探研水泥性能与其环境负荷之间的关系。Yang等^[12]使用LCA方法研究了中国6种强度等级水泥生产的环境负荷。水泥强度等级越高,其环境负荷越大;与相同强度等级的早强水泥相比,普通水泥的环境负荷更大。江辉^[28]发现镍渣的掺入可降低水泥生产的环境负荷,同时提高水泥砂浆的流动性;然而,由于镍渣活性低,镍渣水泥的强度有所下降。

当前研究缺乏水泥性能与其环境负荷之间关系的系统性研究,且绝大多数关于水泥环境负荷的评价未能有效融入性能指标,亟须探研单位质量水泥其单位性能下的综合环境负荷,建立耦合了性能指标的综合环境负荷核算方法,以期实现水泥性能和环境负荷的协同优化。

3 水泥LCA的局限性及发展方向

生命周期评价可以全面评估水泥整个生命周期内对环境造成的影响,但目前该方法评估应用时在边界设定、数据获取及量化方式等方面存在一定的局限性。

LCA的计算结果受系统边界的影响很大,然而系统边界的确定具有一定的主观性。不同LCA研究的取舍规则不尽相同,同时受到研究成本、数据获取等因素的限制,一些研究并未考虑前端水泥原料开采、燃料/原料替代等的影响^[7-8],且大部分研究并未包含末端水泥使用、废弃及回收再利用等阶段^[4,51]。在“双碳”目标下,必将引入大量低品位/非传统的原料和燃料,在固废资源化驱动下,也将促进废弃水泥制品的循环利用,因此,亟须对LCA系统边界的前端和末端进行扩链延展,打通水泥原料—生产—应用—回收全流程闭环研究,对低环境负荷水泥进行

全生命周期评价是未来扩充完善的方向。

数据收集是LCA评价的关键步骤,背景数据在引用时应考虑时间跨度、地域广度等因素的影响,而实景数据会受到数据采集方法及采集仪器的影响。国际数据来源的透明度和可靠性限制了LCA在中国的发展。因此,建立中国水泥生产的本土化动态数据库至关重要。

目前LCA方法并没有统一的核定细化算法,尤其体现在评价过程中影响评价模型选用、特征化当量及特征化因子选取及权重因子确定等方面,致使LCA具有一定的主观性和不确定性^[52],甚至导致不同LCA研究结果之间难以比较。因此,需进一步细化完善赋值依据和核算过程,建立水泥行业综合环境负荷的相对统一且公认的LCA核定评价细则。

此外,当前绝大部分研究仅从环境负荷方面对系统进行评估,鲜见涵盖了性能、成本及社会效益等多维度、全流程的评价体系。建议将生命周期评价与生产成本及产品性能等耦合评价^[12,33,53],以评估系统的综合效益。

4 结论

(1)目前水泥LCA的系统边界大多为“从摇篮到大门”,多数研究重点关注水泥生产过程中资源及能源的消耗和温室气体的排放。在“双碳”目标和固废资源化驱动下,亟须对LCA系统边界的前端和末端进行扩链延展,对低环境负荷水泥进行原料—生产—应用—回收全流程闭环研究是未来扩充完善的方向。

(2)水泥LCA中部分关键参数的选取和赋值尚不统一,同时受系统边界设定、数据来源透明度及可靠性等因素的限制,其评价结果具有一定的主观性。创建中国水泥本土化动态数据库,建立水泥行业综合环境负荷的相对统一且公认的LCA核算评价细则,对最终评估结果进行完整性、敏感性和一致性检查,将是今后研究工作的重点和难点。

(3)目前水泥行业低环境负荷措施包括使用替代性燃料/原料、生产工艺技术改造、碳捕集技术及发展低碳胶凝材料等。当前绝大部分关于水泥环境负荷的评价未能有效融入性能指标,亟需探研耦合了性能指标的综合环境负荷核算方法,以期实现水泥性能和环境负荷的协同优化,并推动扩展涵盖了成本及社会影响等多维度、全流程的综合效益评估。

参考文献:

[1] 付立娟,杨勇,卢静华.水泥工业碳达峰与碳中和前景分析[J].

- 中国建材科技, 2021, 30(4):80-84.
- FU Lijuan, YANG Yong, LU Jinghua. Prospect analysis of carbon peaking and carbon neutralization in cement industry[J]. China Building Materials Science & Technology, 2021, 30(4): 80-84. (in Chinese)
- [2] 张剑波. 环境材料导论[M]. 北京:北京大学出版社, 2008.
- ZHANG Jianbo. Introduction to environmental materials[M]. Beijing:Peking University Press, 2008. (in Chinese)
- [3] International Organization for Standardization. Environmental management-life cycle assessment-principles and framework:ISO 14040—2006[S]. Zurich:ISO, 2006.
- [4] 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, 324:129213.1-129213.12.
- [5] THWE E, KHATIWADA D, GASPARATOS A. Life cycle assessment of a cement plant in Naypyitaw, Myanmar[J]. Cleaner Environmental Systems, 2021, 2:100007.
- [6] LI C, NIE Z R, CUI S P, et al. The life cycle inventory study of cement manufacture in China [J]. Journal of Cleaner Production, 2014, 72:204-211.
- [7] 朱天乐, 何伟, 曾小岚, 等. 中国水泥生产环境负荷研究[J]. 环境科学, 2006, 27(10):2135-2138.
- ZHU Tianle, HE Wei, CENG Xiaolan, et al. Environment load from China's cement production[J]. Environmental Science, 2006, 27(10):2135-2138. (in Chinese)
- [8] 龚志起, 张智慧. 水泥生命周期中物化环境状况的研究[J]. 土木工程学报, 2004, 37(5):86-91.
- GONG Zhiqi, ZHANG Zhihui. A study on embodied environmental profile during the life cycle of cement[J]. China Civil Engineering Journal, 2004, 37(5):86-91. (in Chinese)
- [9] 中国国家标准化管理委员会. 环境管理-生命周期评价-要求与指南:GB/T 24044—2008[S]. 北京:中国标准出版社, 2008.
- Standardization Administration of the People's Republic of China. Environmental management-life cycle assessment-requirements and guidelines:GB/T 24044—2008[S]. Beijing:Standards Press of China, 2008. (in Chinese)
- [10] 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.
- [11] VALDERRAMA C, GRANADOS R, CORTINA J L, et al. Implementation of best available techniques in cement manufacturing: A life-cycle assessment study [J]. Journal of Cleaner Production, 2012, 25:60-67.
- [12] YANG D, FAN L, SHI F, et al. Comparative study of cement manufacturing with different strength grades using the coupled LCA and partial LCC methods-A case study in China [J]. Resources, Conservation and Recycling, 2017, 119:60-68.
- [13] ÇANKAYA S, PEKEY B. A comparative life cycle assessment for sustainable cement production in Turkey [J]. Journal of Environmental Management, 2019, 249:109362.
- [14] 黎瑶, 刘宇. 水泥生产中矿渣综合利用的环境负荷分析研究[J]. 中国材料科技与设备, 2014, 10(3):44-48.
- LI Yao, LIU Yu. Environmental impact analysis on slag as secondary raw material in cement production [J]. Chinese Materials Science Technology & Equipment, 2014, 10(3):44-48. (in Chinese)
- [15] LI C, CUI S P, NIE Z R, et al. The LCA of Portland cement production in China[J]. The International Journal of Life Cycle Assessment, 2015, 20:117-127.
- [16] 丁美荣. 水泥行业碳排放现状分析与减排关键路径探讨[J]. 中国水泥, 2021, 36(7):46-49.
- DING Meirong. Analysis on the current situation of carbon emission in cement industry and discussion on the key path of emission reduction[J]. China Cement, 2021, 36(7):46-49. (in Chinese)
- [17] ZHENG C Y, ZHANG H R, CAI X R, et al. Characteristics of CO₂ and atmospheric pollutant emissions from China's cement industry: A life-cycle perspective [J]. Journal of Cleaner Production, 2021, 282:124533.
- [18] STAFFORD F N, DIAS A C, ARROJA L, et al. Life cycle assessment of the production of Portland cement: A Southern Europe case study[J]. Journal of Cleaner Production, 2016, 126: 159-165.
- [19] PANAHANDEH A, ASADOLLAHFARDI G, MIRMOHAMMADI M. Life cycle assessment of clinker production using refuse-derived fuel: A case study using refuse-derived fuel from Tehran municipal solid waste [J]. Environmental Quality Management, 2017, 27(1):57-66.
- [20] 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.
- [21] SEYLER C, HELLWEG S, MONTEIL M, et al. Life cycle inventory for use of waste solvent as fuel substitute in the cement industry-A multi-input allocation model [J]. Life Cycle Assessment, 2005, 10:120-130.
- [22] KISHAN G S, KUMAR Y H, SAKTHIVEL M, et al. Life cycle assessment on tire derived fuel as alternative fuel in cement industry [J]. Materials Today: Proceedings, 2021, 47(15): 5483-5488.
- [23] STRAZZA C, DEL BORGHI A, GALLO M, et al. Resource productivity enhancement as means for promoting cleaner production: Analysis of co-incineration in cement plants through a life cycle approach[J]. Journal of Cleaner Production, 2011, 19(14):1615-1621.
- [24] GARCÍA-GUSANO D, HERRERA I, GARRAIN D, et al. Life cycle assessment of the Spanish cement industry: Implementation of environmental-friendly solutions [J]. Clean Techn Environ Policy, 2015, 17:59-73.
- [25] CHEN C, HABERT G, BOUZIDI Y, et al. LCA allocation procedure used as an incitative method for waste recycling: An application to mineral additions in concrete [J]. Resources, Conservation and Recycling, 2010, 54(12):1231-1240.
- [26] VALDERRAMA C, GRANADOS R, CORTINA J L, et al.

- Comparative LCA of sewage sludge valorisation as both fuel and raw material substitute in clinker production[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2013, 51:205-213.
- [27] 蒋正武,尹军. 可持续混凝土发展的技术原则与途径[J]. *建筑材料学报*, 2016, 19(6):957-963.
- JIANG Zhengwu, YIN Jun. Technical principle and approaches for development to sustainable concrete[J]. *Journal of Building Materials*, 2016, 19(6):957-963. (in Chinese)
- [28] 江辉. 镍渣水泥基材料的水化性能及生命周期评价[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学, 2020.
- JIANG Hui. Hydration performance and life cycle assessment of nickle slag cementitious materials[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2020. (in Chinese)
- [29] 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.
- [30] VAN DEN HEEDE P, DE BELIE N. Environmental impact and life cycle assessment(LCA) of traditional and 'green' concretes: Literature review and theoretical calculations[J]. *Cement and Concrete Composites*, 2012, 34(4):431-442.
- [31] ISMAEEL W S E. Midpoint and endpoint impact categories in green building rating systems[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2018, 182:783-793.
- [32] VENTURA A, PIERRE M, AGNES J. Environmental impact of a binding course pavement section, with asphalt recycled at varying rates[J]. *Road Materials and Pavement Design*, 2008, 9:319-338.
- [33] 崔素萍,李琛. 水泥生产的环境负荷评价理论与技术应用[C]//第四届中国水泥企业总工程师论坛暨全国水泥企业总工程师联合会年会. 西宁:中国水泥协会, 2011:97-113.
- CUI Suping, LI Chen. Theory and technology application of environmental load assessment in cement production [C]//Proceedings of the 4th China Cement Enterprise Chief Engineer Forum and the Annual Meeting of the National Federation of Chief Engineers of Cement Enterprises. Xining: China Cement Association, 2011:97-113. (in Chinese)
- [34] 高峰. 生命周期评价研究及其在中国镁工业中的应用[D]. 北京:北京工业大学, 2008.
- GAO Feng. Research on life cycle assessment and the application in China magnesium industry[D]. Beijing: Beijing University of Technology, 2008. (in Chinese)
- [35] LIU Y, NIE Z R, SUN B X, et al. Development of Chinese characterization factors for land use in life cycle impact assessment [J]. *Science China Technological Sciences*, 2010, 53(6): 1483-1488.
- [36] 崔素萍,罗楠,王志宏. 建筑材料生命周期评价中不可再生资源耗竭性当量的研究[J]. *中国建材科技*, 2009, 18(4):1-5.
- CUI Suping, LUO Nan, WANG Zhihong. Study on equivalent of non-renewable resources depletion for building materials life-cycle-assessment[J]. *China Building Materials Science & Technology*, 2009, 18(4):1-5. (in Chinese)
- [37] 王新轲,姚建波,张文,等. 基于生命周期理论的墙体材料多目标评价[J]. *建筑材料学报*, 2009, 12(6):742-746, 751.
- WANG Xinke, YAO Jianbo, ZHANG Wen, et al. Research on multi-objective assessment of wall materials based on life cycle theory[J]. *Journal of Building Materials*, 2009, 12(6):742-746, 751. (in Chinese)
- [38] FEIZ R, AMMENBERG J, BAAS L, et al. Improving the CO₂ performance of cement. Part I: Utilizing life-cycle assessment and key performance indicators to assess development within the cement industry[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2015, 98: 272-281.
- [39] 徐小宁. 中国水泥工业的生命周期评价[D]. 大连:大连理工大学, 2013.
- XU Xiaoning. Life cycle assessment of cement in China [D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2013. (in Chinese)
- [40] MORETTI L, CARO S. Critical analysis of the life cycle assessment of the Italian cement industry[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2017, 152:198-210.
- [41] CHEN W, HONG J L, XU C Q. Pollutants generated by cement production in China, their impacts, and the potential for environmental improvement[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2015, 103:61-69.
- [42] 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.
- [43] TUN T Z, BONNET S, GHEEWALA S H. Life cycle assessment of Portland cement production in Myanmar[J]. *Life Cycle Assess*, 2020, 25:2106-2121.
- [44] 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.
- [45] AMMENBERG J, BAAS L, EKLUND M, et al. Improving the CO₂ performance of cement, Part III: The relevance of industrial symbiosis and how to measure its impact[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2015, 98:145-155.
- [46] GARCÍA-GUSANO D, GARRAIN D, HERRERA I, et al. Life cycle assessment of applying CO₂ post-combustion capture to the Spanish cement production[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2015, 104:328-338.
- [47] GONCHAROV A, ZHUTOVSKY S. Eco-friendly belite cement from crude calcareous oil shale with low calorific value[J]. *Cement and Concrete Research*, 2022, 159:106874.
- [48] 吴红. 硅酸盐水泥和硫铝酸盐水泥复合的生态设计[D]. 北京:北京工业大学, 2007.
- WU Hong. Eco-design on silicate cement and sulphoaluminate cement complex[D]. Beijing: Beijing University of Technology, 2007. (in Chinese)
- [49] SHEN W G, CAO L, LI Q, et al. Is magnesia cement low carbon? Life cycle carbon footprint comparing with Portland cement[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2016, 131:20-27.
- [50] MADDALENA R, ROBERTS J J, HAMILTON A. Can Portland cement be replaced by low-carbon alternative materials?

(下转第677页)

- retarders on the early hydration of calcium-sulpho-aluminate (CSA) type cements[J]. Cement and Concrete Research, 2016, 84(6):62-75.
- [12] 王琴,李时雨,潘硕,等.不同缓凝剂对高贝利特硫铝酸盐水泥性能的影响及机制[J].建筑材料学报,2020,23(2):239-247. WANG Qin, LI Shiyu, PAN Shuo, et al. Influence and mechanism of different retarders on the performance of high belite sulphoaluminate cement[J]. Journal of Building Materials, 2020, 23(2):239-247. (in Chinese)
- [13] TELESKA A, MARROCCOLI M, COPPOLA L, et al. Tartaric acid effects on hydration development and physico-mechanical properties of blended calcium sulphoaluminate cements[J]. Cement and Concrete Composites, 2021, 124:104275.
- [14] TAN H B, ZOU F B, LIU M, et al. Effect of the adsorbing behavior of phosphate retarders on hydration of cement paste[J]. Journal of Materials in Civil Engineering, 2017, 29(9):04017088.
- [15] TAN H B, GUO Y L, ZOU F B, et al. Effect of borax on rheology of calcium sulphoaluminate cement paste in the presence of polycarboxylate superplasticizer[J]. Construction and Building Materials, 2017, 139:277-285.
- [16] PANG X Y, BOONTHEUNG P, BOUL P J. Dynamic retarder exchange as a trigger for Portland cement hydration[J]. Cement and Concrete Research, 2014, 63:20-28.
- [17] BULLERJAHN F, ZAJAC M, SKOCEK J, et al. The role of boron during the early hydration of belite ye'elimite ferrite cements [J]. Construction and Building Materials, 2019, 215:252-263.

(上接第669页)

- A study on the thermal properties and carbon emissions of innovative cements[J]. Journal of Cleaner Production, 2018, 186: 933-942.
- [51] 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.
- [52] HUIJBRETS M A J. Application of uncertainty and variability in LCA. Part I: A general framework for the analysis of uncertainty and variability in life cycle assessment[J]. International Journal of Life Cycle Assessment, 1998, 3(5):273-280.
- [53] 刘兵.基于机器学习的再生混凝土强度预测和LCA-LCC生态效率评价[D].北京:北京交通大学,2021.
- LIU Bing. Recycled aggregate concrete strength prediction and eco-efficiency evaluation of LCA-LCC based on machine learning [D]. Beijing:Beijing Jiaotong University, 2021. (in Chinese)