

以煤矸石和粉煤灰 为混合材的水泥生命周期 环境影响评价

李正泽¹, 李刚¹, 郭晓璐¹, 刘卓霖², 余安明¹

摘要:采用LCA(生命周期评价)方法,对比研究了广州某水泥厂采用煤矸石和粉煤灰作混合材前后,分别生产的P·O42.5R水泥和P·II 42.5R水泥在整个生产过程的环境影响,并对评价结果进行了分析。选定气候变化(GWP)、环境酸化(AP)、非生物资源消耗(ADP)、富营养化(EP)、可吸入无机物(RI)以及光化学臭氧合成(POFP)6种环境影响类型指标作为评价指标。经过LCA计算得出,在水泥粉磨过程中加入3.34%的煤矸石和3.32%的粉煤灰,对水泥生产过程的六种环境影响类型指标均有降低作用,GWP、ADP、AP、EP、RI和POFP分别降低8.52%、9.18%、9.09%、8.68%、8.88%和8.29%。

关键词:生命周期评价;煤矸石;粉煤灰;水泥;环境影响

中图分类号:TQ172.6 文献标识码:A 文章编号:1001-6171(2023)06-0086-05

DOI:10.19698/j.cnki.1001-6171.20236086

Environmental Impact Assessment of Cement Life Cycle with Gangue and Fly Ash as Mixed Material

LI Zhengze¹, LI Gang¹, GUO Xiaolu¹, LIU Zhuolin², SHE Anming¹

(1. School of Materials Science and Engineering, Tongji University, Shanghai 201804, China; 2. China Resources Cement Technology R&D Co., Ltd., Guangzhou Guangdong 510460, China)

Abstract: The Life Cycle Assessment (LCA) method was used to compare and study the environmental impact of the whole production process of P·O 42.5R cement and P·II 42.5R cement produced before and after the use of mixed material in a cement plant in Guangzhou, and the evaluation results were analyzed. Six environmental impact types were selected: Global Warming

基金项目:“十四五”国家重点研发计划项目(2021YFB3802001)

通讯地址:1 同济大学材料科学与工程学院,上海 201804; 2 华润水泥技术研发有限公司,广东 广州 510460;

收稿日期:2023-04-07; 编辑:张志红

Potential(*GWP*), Acidification Potential(*AP*), Abiotic Depletion Potential(*ADP*), Eutrophication Potential(*EP*), Respirable Inorganic material(*RI*), and Photochemical Ozone Formation Potential(*POFP*). LCA calculation shows that adding 3.34% gangue and 3.32% fly ash in the cement grinding process can reduce the six environmental impacts of the cement production process. *GWP*, *ADP*, *AP*, *EP*, *RI* and *POFP* decreased by 8.52%, 9.18%, 9.09%, 8.68%, 8.88% and 8.29% respectively.

Key words: life cycle assessment; gangue; fly ash; cement; environmental impact

煤矸石和粉煤灰是煤矿开采、火力发电等生产过程中产生的工业废弃物,2021年,我国煤矸石产量达7.43亿吨^[1],粉煤灰产量达7.90亿吨^[2]。若这些工业废弃物不加处理直接排放或废弃,不仅会侵占土地、污染环境,还会造成巨大的资源浪费。煤矸石和粉煤灰中含有丰富的硅、铝、钙、铁等元素^[1-2],将煤矸石和粉煤灰作为水泥生产替代原料,是目前应用比较广泛的资源化处理方法。采用此方法进行资源化处理,可以促进煤矸石和粉煤灰中有用元素的重新利用,将其中的有害物质(如重金属等)固化在水泥中,同时也可以降低整个水泥生产过程对环境的不良影响。

LCA (Life Cycle Assessment) 生命周期评价方法是针对某产品的生产过程开展全生命周期研究的一种系统方法^[3],是对目标产品生产过程中带来的环境影响进行评估的方法,包括目标与范围的确定(Goal and Scope Definition, *GSD*)、生命周期清单分析(Life Cycle Inventory, *LCI*)、生命周期影响评价(Life Cycle Impact Assessment, *LCIA*)和生命周期解释(Life Cycle Interpretation)四个相互关联的步骤^[3]。LCA可以辅助确定产品整个生产流程的潜在环境影响,评估生产流程的环境性能,从而获得合适的改善方案,LCA四步骤示意如图1所示。

本文将利用LCA方法,研究煤矸石和粉煤灰作为混合材对水泥生产环境的影响,通过设计两组LCA方案,对比两组目标产品的环境影响异同,为水泥工业利用煤矸石和粉煤灰作替代原料,制订节能减排计划提供部分理论依据。

1 LCA 研究目标与范围的确定

选取1t广州某水泥厂生产的以煤矸石和粉煤

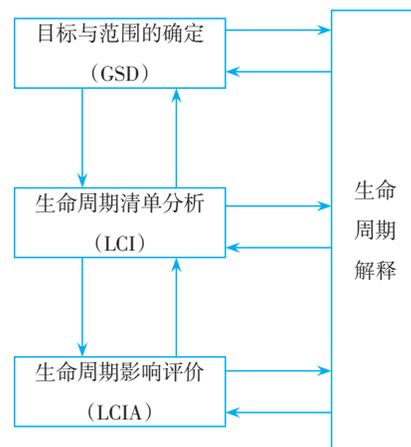


图1 LCA四步骤示意

灰作为混合材的P·O42.5R水泥和1t该水泥厂生产的不使用混合材的P·II 42.5R水泥作为功能单元。

LCA研究范围的确定大多遵循“从摇篮到大门”^[4]的原则,水泥生产过程的LCA研究的范围是从原料开采到水泥成品生产的整个工艺过程。该水泥厂在P·O42.5R水泥粉磨过程中,煤矸石和粉煤灰不经煅烧,直接作为替代原料加入,掺量分别为3.34%和3.32%;P·II 42.5R水泥在粉磨过程中不使用煤矸石和粉煤灰。按照LCA原理,根据水泥生产工艺流程,分别构建P·O42.5R水泥和P·II水泥LCA研究系统边界,如图2所示。

2 生命周期清单分析

按照LCA原理,生命周期清单分析是整理汇总在系统边界内的所有输入物和输出物^[5]。生命周期清单数据分为背景数据和实景数据,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;实景数据是在实际生产过程中,通过调研获得的原料及能源的消耗、污染物的排放等原始数据或由原始数据计算得到的核算数据^[6]。本次

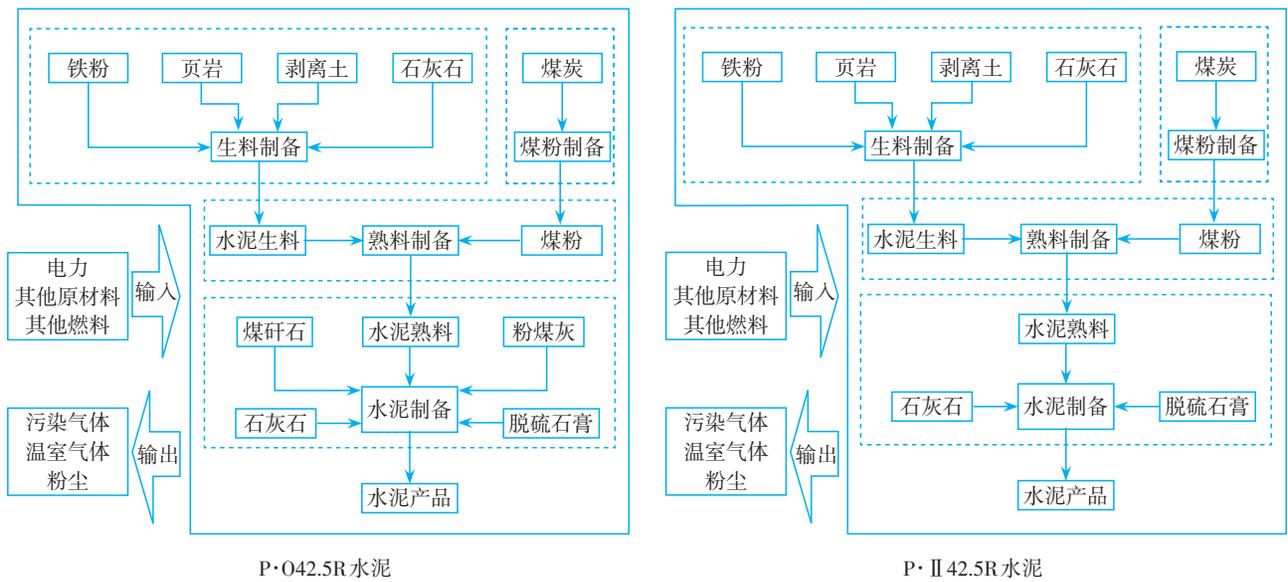


图2 LCA研究系统边界

LCA研究采用的生料、煤粉及熟料生产过程和水泥最终粉磨过程中的数据,为水泥厂调研的实景数据,电力及其他除废料外的原材料采集过程数据引用自中国生命周期核心数据库CLCD,为背景数据。

2.1 输入物清单

输入物清单需整理汇总在整个水泥生产过程中所消耗的原材料及能源清单,所有数据保留小数点后两位。根据该水泥厂提供的数据,生产1t P·O42.5R水泥和1t P·II42.5R水泥所需要的原材料和能耗清单如表1所示。

该水泥厂生产的P·O42.5R水泥和P·II42.5R水泥,除了最终的粉磨过程中加入的物料种类不同外,其他工艺过程,如生料粉磨、熟料生产等加入的物料种类均一致。生产1t生料和1t熟料所需要的原材料及能耗清单分别如表2、表3所示。其中,1.12kg原煤粉磨制得1kg煤粉的同时,将消耗

0.05kW·h的电量。

2.2 输出物清单

输出物清单需要汇总分析在整个水泥生产过程中可能会排放的所有温室气体和污染物。该水泥厂P·O42.5R水泥和P·II42.5R水泥的生产均可分为原料开采、煤粉粉磨、生料粉磨、熟料烧成和水泥粉磨等流程。其中,熟料烧成污染物的排放量占比最高,主要有CO、CO₂、SO₂、NO_x、甲烷、NMVOC(非甲烷挥发性有机化合物)和可吸入颗粒物(PM₁₀)等。煤粉粉磨、生料粉磨、水泥粉磨直接排放的污染物主要为可吸入颗粒物(PM₁₀)。除废料外的各种原料开采及发电过程中的污染物排放数据,均采用中国生命周期核心数据库CLCD所提供的数据。除了上述气体和污染物外,其他污染气体、废水、固体废弃物等在水泥生产过程中排放量较小,本次LCA研究中不作考虑。

表1 水泥粉磨所需原材料和能耗清单

水泥品种	熟料,t	脱硫石膏,t	石灰石,t	煤矸石,t	粉煤灰,t	电耗,kW·h
P·O42.5R	0.84	0.04	0.06	0.03	0.03	32.00
P·II42.5R	0.91	0.05	0.04	-	-	37.56

表2 生产1t生料所需原材料和能耗清单

石灰石,t	铁粉,t	剥离土,t	页岩,t	其他掺合料,t	电耗,kW·h
0.88	0.05	0.03	0.07	4.25×10 ⁻³	14.94

表3 生产1t熟料所需原材料和能耗清单

生料,t	煤粉,kg	电耗,kW·h
1.38	104.04	28.67

3 生命周期影响评价

生命周期影响评价是根据生命周期清单分析汇总的输入数据和输出数据,对产品的整个生命周期所带来的环境影响进行分类和特征化^[3]。在进行水泥生产 LCA 分析时,通常采用 CML2001 分类方法^[7-9],此方法是荷兰莱顿大学环境研究中心在 2001 年所发表的一种基于传统生命周期清单分析特征及标准化的方法。本次水泥生产 LCA 研究选择六种常用的环境影响类型指标,通过计算,分别得出生产 1t P·O42.5R 水泥和 1t P·II 42.5R 水泥的六种环境影响类型指标参数,如表 4、表 5 所示。

4 生命周期解释

GWP:气候变化,主要和 CO₂、CH₄ 等温室气体的排放量有关,排放量越多,GWP 值越大。由表 5 可知,生产 1t P·O42.5R 水泥的 GWP 值为 850.13,生产 1t P·II 42.5R 水泥的 GWP 值为 929.34,GWP 值降幅为 8.52%。

ADP:非生物资源消耗,主要包括大气、水、土壤、矿产等自然资源,消耗非生物资源越多,ADP 值越大。由表 5 可知,生产 1t P·O42.5R 水泥的 ADP 值为 1.88×10^{-4} ,生产 1t P·II 42.5R 水泥的 ADP 值为 2.07×10^{-4} ,ADP 值降幅为 9.18%。

AP:酸化,主要与 SO₂ 和 NO_x 等气体的排放量有关,排放量越多,AP 值越大。由表 5 可知,生产

1t P·O42.5R 水泥的 AP 值为 1.50,生产 1t P·II 42.5R 水泥的 AP 值为 1.65,AP 值降幅为 9.09%。

EP:富营养化,主要受 NH₃ 和 NO_x 等含氮气体排放量影响,排放量越多,EP 值越大。由表 5 可知,生产 1t P·O42.5R 水泥的 EP 值为 2.00×10^{-1} ,生产 1t P·II 42.5R 水泥的 EP 值为 2.19×10^{-1} ,EP 值降幅为 8.68%。

RI:可吸入无机物,主要和可吸入颗粒物 PM₁₀, PM_{2.5} 和 CO 等有关。由表 5 可知,生产 1t P·O 42.5R 水泥的 RI 值为 3.90×10^{-1} ,生产 1t P·II 42.5R 水泥的 RI 值为 4.28×10^{-1} ,RI 值降幅为 8.88%。

POFP:光化学臭氧合成,主要和 NO_x 等气体有关。由表 5 可知,生产 1t P·O42.5R 水泥的 POFP 值为 1.66×10^{-1} ,生产 1t P·II 42.5R 水泥的 POFP 值为 1.81×10^{-1} ,POFP 值降幅为 8.29%。

综上所述,生产 1t 煤矸石掺量 3.34%、粉煤灰掺量 3.32% 的 P·O42.5R 水泥,其各项环境影响类型指标相比生产 1t 不掺加煤矸石和粉煤灰的 P·II 42.5R 水泥,普遍降低了 8%~9%,各项指标的降幅差距不大。这可能是由于掺加煤矸石和粉煤灰可以减少水泥熟料的用量,而水泥熟料生产是整个水泥生产过程中产生环境影响最大的环节,因此,在水泥生产中掺加煤矸石和粉煤灰,减少熟料用量,可以显著降低整个水泥生产过程的环境影响。

表 4 环境影响类型指标

序号	环境影响类型指标	单位	主要清单物质
1	气候变化(GWP)	kg CO ₂ eq.	CO ₂ , CH ₄ , N ₂ O...
2	非生物资源消耗(ADP)	kg Sb eq.	铁, 锰, 铜...
3	酸化(AP)	kg SO ₂ eq.	SO ₂ , NO _x , NH ₃ ...
4	富营养化(EP)	kg PO ₄ ³⁻ eq.	NH ₃ , NH ₄ -N, COD...
5	可吸入无机物(RI)	kg PM _{2.5} eq.	CO, PM ₁₀ , PM _{2.5} ...
6	光化学臭氧合成(POFP)	kg NMVOC eq.	C ₂ H ₆ , C ₂ H ₄ ...

表 5 两组研究对象的六种环境影响类型指标参数及变化率*

水泥品种	GWP	ADP	AP	EP	RI	POFP
P·O42.5R 水泥	850.13	1.88×10^{-4}	1.50	2.00×10^{-1}	3.90×10^{-1}	1.66×10^{-1}
P·II 42.5R 水泥	929.34	2.07×10^{-4}	1.65	2.19×10^{-1}	4.28×10^{-1}	1.81×10^{-1}
降幅,%	8.52	9.18	9.09	8.68	8.88	8.29

*通过生命周期评价软件计算得到

(下转第 94 页)

代原料用于制备混凝土材料。生物质燃烧灰混凝土在抗压强度和抗弯强度方面均达到了与正常混凝土相似的力学性能。在满足试样强度的前提下,采用生物质燃烧灰制备的混凝土可以很好地减少水泥消耗,从而减少二氧化碳排放。

(1)生物质燃烧灰制备混凝土的需水量略高于传统的粉煤灰制备的混凝土,木材燃烧灰掺配粉煤灰的需水量略高于纯水泥制品。

(2)在抗压强度方面,纯水泥混合物混凝土的前7d抗压强度最高。除木材燃烧灰外,其余生物质燃烧灰混凝土的28~56d抗压强度基本与纯水泥混合物混凝土相当,表明生物质燃烧灰对混凝土早期强度的促进作用不大,但对于晚期强度的补强发挥着重要作用。

(3)在抗弯强度方面,除纯木材燃烧灰外,其余试验组粉煤灰的56d抗弯强度均与纯水泥组实验数值相当。试验结果表明,生物质作为替代原料制备混凝土的抗弯强度可以满足设计要求。

参考文献:

- [1] 张强,李耀庄,刘保华. 秸秆资源在混凝土中应用的研究进展[J]. 硅酸盐通报,2015,34(4):1000-1003.
- [2] 许鹏,王正君,宫滢. 低温预处理对秸秆灰基火山灰活性的影响分析[J]. 混凝土,2019(2):44-47.
- [3] ChaussyMariann, ChabannesMorgan, DayArnaud, BulteelDavid, BecquartFrederic, LaidoudiBoubker. Plant Biomass Used for Green Concrete: A Review of Treatment Methods[J]. Construction Technologies and Architecture, 2022, 1(1):601-611.
- [4] 李嘉昊,王正君,贾明霖,等. 生物质灰混凝土研究方法及现状分析[J]. 广东建材,2022,38(9):30-32.
- [5] 刘勇,冯竟竟,于雷,等. 生物质灰对水泥硬化浆体抗压强度影响的试验研究[J]. 硅酸盐通报,2017,36(5):1718-1722.
- [6] Rosales M, RosalesJ, AgrelaF, Sánchez de Rojas MI, Cabrera M. Design of a new eco-hybrid cement for concrete pavement, made with processed mixed recycled aggregates and olive biomass bottom ash as supplementary cement materials[J]. Construction and Building Materials,2022,358(1):129417.
- [7] 何嘉乐,张坤,刘娟,等. 玉米芯生物质混凝土绿色墙体材料性能研究[J]. 山西建筑,2020,46(8):96-98.
- [8] PioDT, GomesHGCMF, RuivoLCM, MatosMAA, MonteiroJF, FradeJR, Tarelho LAC. Concrete as low-cost catalyst to improve gas quality during biomass gasification in a pilot-scale gasifier[J]. Energy,

2021,233(1):120931.

- [9] 赵保峰,谢洪璋,任常在,等. 生物质电厂灰渣建材化应用[J]. 科学技术与工程,2022,22(17):6802-6811.
- [10] 原玉磊,马桂宁,刘宗武,等. 生物质柴油基预制混凝土构件脱模剂的制备及性能分析[J]. 建筑施工,2022,44(4):834-837.
- [11] OthumanMydinMdAzree, NawiMohdNasrunMohd, OdehRuba A, SalamehAnas A. Potential of Biomass Frond Fiber on Mechanical Properties of Green Foamed Concrete[J]. Sustainability, 2022, 14(12): 7185.◇

(上接第89页)

5 结语

通过对广州某水泥厂生产的P·O42.5R水泥和P·II 42.5R水泥分别进行LCA分析和对比可知,在水泥生产中加入3.34%的煤矸石和3.32%的粉煤灰,对六项环境影响类型指标均有降低作用,GWP、ADP、AP、EP、RI和POFP分别降低8.52%、9.18%、9.09%、8.68%、8.88%和8.29%。因此,将煤矸石和粉煤灰应用于水泥生产中,不仅可以协同处置废弃物,还可以降低水泥生产过程中对环境造成的影响。

参考文献:

- [1] 赵亮,李超,任启欣. 煤矸石在水泥生产中的应用[J]. 山西化工,2015,35(3):60-63.
- [2] 吴元锋,仪桂云,刘全润,等. 粉煤灰综合利用现状[J]. 洁净煤技术,2013,19(6):100-104.
- [3] International Organization for Standardization. ISO 14040:2006 Environmental Management—Life Cycle Assessment—Principles and Framework[S]. Switzerland:ISO, 2006.
- [4] Real Sofia et al. Life Cycle Assessment of Thermoactivated Recycled Cement Production[J]. Materials, 2022, 15(19):6766-6766.
- [5] 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.
- [6] 郭晓璐,李寅雪,袁淑婷. 水泥生命周期评价及其低环境负荷研究进展[J]. 建筑材料学报,2023,26(6):660-669+677.
- [7] 段宁,程胜高. 生命周期评价方法体系及其对比分析[J]. 安徽农业科学,2008,36(32):13923-13925+14049.
- [8] 姜雪,李小平,董珑丽,等. LCA在产品生命周期环境影响评价中的应用[J]. 中国人口·资源与环境,2014,24(S2):188-191.
- [9] Yuan Zengwei, Zhu Ya'nan, et. Life-cycle assessment of Continuous Pad-dyeing Technology for Cotton Fabrics[J]. The International Journal of Life Cycle Assessment, 2013,18(3):659-672.

◇