

采用全生命周期方法评价以市政污泥为原料的水泥的环境影响

李正泽¹, 李 刚¹, 郭晓璐^{1,2}, 刘卓霖², 余安明¹

(1.先进土木工程材料教育部重点实验室, 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)

摘要: 采用生命周期评价(LCA)方法对以市政污泥为原料的水泥整个生产过程的环境影响进行了评价和对比分析。选定了气候变化(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种环境影响类型作为评价指标。经过LCA计算得出, 水泥熟料生产中掺入5%的市政污泥, 可以使水泥生产过程的六种环境影响得到不同程度的降低, GWP、ADP、AP、EP、RI和POFP分别降低0.75%, 14.45%, 9.04%, 0.44%, 3.23%, 6.47%。

关键词: 生命周期评价; 市政污泥; 水泥; 环境影响

Abstract: Life cycle assessment (LCA) method was used to evaluate and compare the environmental impact of the whole production process of cement using sludge as raw material. Six environmental impact types including Global Warming Potential (GWP), Acidification Potential (AP), Abiotic Depletion Potential (ADP), Eutrophication Potential (EP), Respirable Inorganic material (RI), and Photochemical Ozone Formation Potential (POFP) were selected as evaluation indicator. LCA calculates shows that applying 5% municipal sludge to cement clinker production can reduce the six environmental impacts of the cement production process to varying degrees. GWP, ADP, AP, EP, RI, POFP decreased by 0.75%, 14.45%, 9.04%, 0.44%, 3.23%, 6.47% respectively.

Key words: life cycle assessment; sludge; cement; environmental impact

First author's address: Key Laboratory of Advanced Civil Engineering Materials of the Ministry of Education, School of Materials Science and Engineering, Tongji University, Shanghai 201804, China

中图分类号: TQ172.9 文献标志码: A 文章编号: 1002-9877(2023)02-0025-04 DOI: 10.13739/j.cnki.cn11-1899/tq.2023.02.006

0 引言

水泥生产是我国工业体系中的资源消耗大头, 2021年我国水泥工业的碳排放达到12.82亿t, 约占全国碳排放总量的13%^[1-2]。因此水泥生产节能减排工作是我国经济社会发展全面绿色转型至关重要的一环。根据已有的研究^[3], 水泥工业节能减排措施主要有燃料替代、原料替代、提高能源效率、熟料减量等方式。

市政污泥作为一种由复杂的有机混合物和微生物、无机物以及水分组成的非均相絮状物质^[4], 经过脱水后, 既可以作为生产水泥的原材料, 也可以提供热值^[5]。同时, 市政污泥每年的产量巨大, 2021年已经达到5552万t。目前处理市政污泥的手段主要有填埋法、焚烧法、资源化处理等^[6], 其中焚烧法会消耗大量的能源, 同时也会产生较多的污染气体, 而填

埋法会使污泥中的重金属、有机污染物等进入土壤, 给生态环境带来极大的危害。如果可以将市政污泥处理和水泥生产结合起来, 即市政污泥作为替代燃料和替代原材料应用到水泥生产过程中^[7], 此举不仅可以使市政污泥中的重金属等污染物质固化稳定于水泥内, 还可以减少水泥生产过程中的化石燃料使用量。

生命周期评价(Life Cycle Assessment, LCA)是针对某产品生产过程开展全生命周期研究的一种系统方法^[8], 可以辅助确定整个流程的潜在环境影响, 评估流程的环境性能, 从而获得合适的改善方案。本文将设计两组LCA评价对象, 第一组为有市政污泥作为原料的水泥生产过程, 第二组为没有市政污泥参与的生产过程, 对比两组环境影响的异同, 为市政污泥处理作为水泥生产替代性原料提供部分理论

基金项目: “十四五”国家重点研发计划项目(2021YFB3802001)

通讯作者: 余安明, 博士, 讲师, E-mail: sheanming@tongji.edu.cn

依据。

1 以市政污泥为原料的水泥LCA方法

LCA可以对目标产品的生产过程带来的环境影响进行评估,由ISO 14040标准^[8]可知,LCA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)四个相互联系步骤,如图1所示。

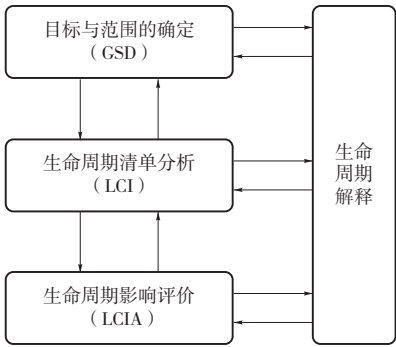


图1 LCA四个步骤联系示意

2 目标与范围的确定

本次LCA的研究对象为国内某水泥厂生产的以市政污泥为原料的水泥,品种为P·II 52.5R硅酸盐早强水泥,研究中选取1 t P·II 52.5R水泥作为功能单元。对于水泥生产过程的LCA,遵循的大多是“从摇篮到大门”^[9],即从原料开采,到水泥被生产出来的整个过程。根据水泥厂提供的资料可知,在水泥生产流程中,干污泥的参与方式为和生料等其他原料一起进入窑内高温煅烧,其中干污泥部分燃烧提供热量,作为替代燃料;燃烧之后的灰分最终成为熟料的一部分。根据此流程构建系统边界,如图2所示。

3 生命周期清单分析

根据LCA原理,生命周期清单分析是计算系统边界内的所有资源消耗量和排出物量^[10],对所有的输入物和输出物进行整理汇总。本次研究中生料、煤粉及熟料等相应数据为从水泥厂采集的实际数据,电力以及除废料外的原材料采集全部选用中国生命周期核心数据库CLCD所提供的数据。

3.1 输入物清单

根据该水泥厂所提供的数据可知,生产1 t P·II 52.5R所需要的熟料、外加剂以及能源消耗见表1。

该水泥厂所生产的不同品种水泥除了最终粉磨过程的原料使用情况不同外,其他过程消耗的原材料

料以及能源都相同。生产1 t熟料所需要消耗的主要原材料以及能源如表2所示,其中干污泥主要来源于当地城市自来水厂,占生料质量的5%左右。

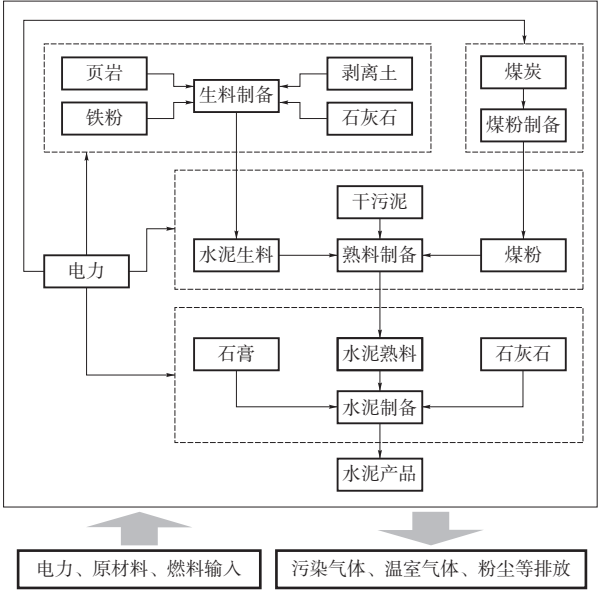


图2 LCA研究的系统边界

表1 1 t P·II 52.5R水泥粉磨所需要的原料清单

熟料/t	脱硫石膏/t	石灰石/t	电耗/kWh
0.93	0.05	0.02	50.74

表2 生产1 t熟料所需要主要原料和能源清单

生料/t	煤粉/kg	干污泥/t	工业用水/t	电耗/kWh
1.45	101.04	0.07	0.3	27.16

其中煤粉制备为1.17 kg煤炭材料生产1 kg煤粉,同时消耗0.04 kWh的电力。工业用水由于污染物排放较少,且回收率较高^[11],在LCA研究中如果用量不大一般做忽略处理。生产1 t该生料所需要消耗的主要原材料以及能源如表3所示。

表3 生产1 t生料所需要主要原料和能源清单

混合料/t	砂岩/t	铁粉/t	其他废料/t	电耗/kWh
0.97	0.03	0.04	0.003 4	18.41

3.2 输出物清单

本次LCA所选取系统边界内的排出物有一氧化碳、二氧化碳、二氧化硫、氮氧化物、甲烷、非甲烷挥发性有机化合物(non-methane volatile organic compounds, NMVOC)和可吸入颗粒物(PM₁₀)等。其中一氧化碳、二氧化碳、二氧化硫、氮氧化物等主要来自各生产环节化石燃料的燃烧,可吸入颗粒物(PM₁₀)主要来自煤粉粉磨、生料粉磨、水泥粉磨等粉磨过程。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研究中不做考虑。输出物数据来源于数据库的原料生产过程排放数

据,在系统里只有使用权限,没有查看权限,直接对接到算法里。

4 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中所汇总的输入数据和输出数据,对产品整个生命周期所带来的环境影响进行分类和特征化^[8]。在分析水泥生产时,通常采用CML2001(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)的分类方法^[12-14]。本次LCA选择常用的六种指标进行分析研究,所选取的六种指标见表4。

在本次研究中,有两组评价对象,其中第一组为有市政污泥作为原料的水泥生产过程,其详细信息如第3节中所述,现在还需要分析第二组没有市政污泥参与的水泥生产过程。首先,如果没有干污泥就需要消耗更多的煤粉提供空缺的热量,根据水泥厂所提供的数据,此类型干污泥的热值约为11 860 kJ/kg,在该生产过程中每生产1 t熟料就要加入72.88 kg的干污泥,这部分干污泥所提供的热量约864.5 MJ。而生产1 t熟料同时也要消耗101.04 kg的煤粉,该水泥厂所使用的煤热值为24 050 kJ/kg,则煤粉提供的热量大约为2 430 MJ。综上,每生产1 t熟

料需要3 294.5 MJ热量。如果不使用干污泥,那这部分热量全部要煤粉来提供,就需要消耗136.99 kg的煤粉。而干污泥燃烧后的灰分可由其他废料替代,这部分废料不计入核算。除此之外,燃烧煤粉所带来的污染气体比如NO_x及SO₂等的排放量会更大,这部分变化需要考虑在内。

表4 环境影响类型指标

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

注: ①eq, equivalent缩写,意为当量。例如气候变化指标是以CO₂为基准物质,其他各种温室气体按温室效应的强弱都有各自的CO₂当量因子,因此产品生命周期的各种温室气体排放量可以各自乘以当量因子,累加得到气候变化指标总量(通常也称为产品碳足迹, Product Carbon Footprint, PCF),其单位为kg CO₂ eq,同样的,非生物资源消耗以及酸化等环境影响也有各自的基准物质和相应的当量因子,最终累加即为各环境影响类型指标。②Sb, 锑元素。③NMVOC, non-methane volatile organic compounds, 非甲烷挥发性有机化合物。

经过计算,分别得出第一组和第二组的六种环境影响参数如表5所示。

表5 两组LCA的六种环境影响参数以及变化率

影响参数	GWP	ADP	AP	EP	RI	POFP
第一组	958.87	2.25E-04	1.61	22.86E-02	4.49E-01	1.88E-01
第二组	966.15	2.63E-04	1.77	22.96E-02	4.64E-01	2.01E-01
减少比例	0.75%	14.45%	9.04%	0.44%	3.23%	6.47%

注:通过生命周期评价软件计算得到。

5 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,第一组的GWP值为958.87,第二组为966.15,降幅为0.75%,可见将市政污泥作为部分替代燃料和替代原料,可以带来减轻气候变化的效果,但并不是特别明显。

ADP,非生物资源,主要包括大气、水、土地、矿产等自然资源,消耗非生物资源越多,ADP值越大。第一组的ADP值为2.25E-04,第二组为2.63E-04,降幅为14.45%,ADP值降幅较大可能和煤粉消耗量减少较多有关,可见将市政污泥作为部分替代燃料和替代原料,可以达到减少非生物资源消耗的效果。

AP,酸化,主要与SO₂和NO_x等气体的排放量有关。第一组的AP值为1.61,第二组为1.77,降幅为

9.04%,AP值降幅较大可能和煤粉燃烧会排放更多的SO₂和NO_x等气体有关,可见将市政污泥作为部分替代燃料和替代原料,可以产生减少环境酸化的效果。

EP,富营养化,主要受到NH₃和NO_x等含氮气体排放量的影响。第一组的EP值为22.86E-02,第二组为22.96E-02,降幅为0.44%,可见将市政污泥作为部分替代燃料和替代原料,可以产生减轻富营养化的效果,但是效果并不明显。

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。第一组的RI值为4.49E-01,第二组为4.64E-01,降幅为3.23%,这部分降幅可能和煤粉粉磨过程产生的扬尘有关,可见将市政污泥作为部分替代燃料和替代原料,可以产生降低可吸入无机物排量的效果。

POFP,光化学臭氧合成,主要和NO_x等气体有

关。第一组的POFP值为 $1.88E-01$,第二组为 $2.01E-01$,降幅为6.47%,可见将市政污泥作为部分替代燃料和替代原料,可以产生减轻光化学臭氧合成的效果。

综上所述,可以发现在水泥生产过程中加入市政污泥,起到的主要作用是替代燃料,同时污泥燃烧后的灰分也可作为替代原料。其对ADP、AP、RI以及POFP有较为明显的减轻效果,其中最为明显的是ADP,但是对GWP和EP的影响较小。

6 结论

采用LCA环境影响评价,结果表明在水泥熟料生产中掺入5%的市政污泥,可以起到替代燃料的效果。同时使水泥生产过程的六种环境影响得到不同程度的降低,GWP、ADP、AP、EP、RI和POFP分别降低0.75%、14.45%、9.04%、0.44%、3.23%和6.47%。因此在实际生产过程中,将市政污泥应用在水泥生产中不仅处理了市政污泥,还可以减轻水泥生产对环境的影响。

参考文献:

- [1] 中国建筑材料工业碳排放报告(2020年度)[J]. 中国建材, 2021(4): 59-62.
- [2] 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.
- [3] 白玫. 中国水泥工业碳达峰、碳中和实现路径研究[J]. 价格理论与实践, 2021(4): 4-11+53.
- [4] 王甘霖, 姜胜, 仇晨光, 等. 城市污泥处理处置技术综述[J]. 水电与新能源, 2018, 32(2): 75-78.
- [5] A. Zabanitout, C. Theofilou. Green energy at cement kiln in Cyprus—Use of sewage sludge as a conventional fuel substitute[J]. Renewable & sustainable energy reviews, 2008, 12(2): 531-541.
- [6] 杨裕起. 城市污泥处理处置技术研究进展[J]. 化工设计通讯, 2020, 46(2): 223+231.
- [7] 林奕明, 周少奇, 周德钧, 等. 利用城市污水处理厂污泥生产生态水泥[J]. 环境科学, 2011, 32(2): 524-529.
- [8] International Organization for Standardization. ISO 14040: 2006 Environmental Management—Life Cycle Assessment—Principles and Framework[S]. Switzerland: ISO, 2006.
- [9] Real Sofia et al. Life Cycle Assessment of Thermoactivated Recycled Cement Production[J]. Materials, 2022, 15(19): 6766-6766.
- [10] 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.
- [11] Chen Li, Suping Cui, Zuoren Nie, et al. The LCA of portland cement production in China[J]. The International Journal of Life Cycle Assessment, 2015, 20(1): 117-127.
- [12] 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.
- [13] 姜雪, 李小平, 董琬丽, 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.
- [14] Zeng-Wei Yuan, Ya-Nan Zhu, Jun-Kui Shi, et al. Life-cycle assessment of continuous pad-dyeing technology for cotton fabrics[J]. The International Journal of Life Cycle Assessment, 2013, 18(3): 659-672.

(编辑 王新频)



水泥

欢迎 订阅《水泥》杂志

征订启事

2023 版

一刊在手, 生产不愁!

《水泥》杂志是由中国建筑材料联合会主管、建筑材料工业技术情报研究所主办的全国性建材科技期刊, 1974年创刊, 以“面向生产, 注重实用”为办刊宗旨, 适合水泥及相关企业、科研院所、大专院校及设计单位的技术人员阅读参考。本刊为第二、第三届全国期刊奖百种重点期刊、全国优秀科技期刊、全国建材优秀期刊、美国化学文摘(CA)收录期刊、入选“中华人民共和国成立70周年精品期刊展”、中文核心期刊(2008版)、中国科技核心期刊(2006版)。

主要栏目: 双碳专题、协同处置、专题报道、试验研究、智能控制、收尘环保、水泥与混凝土、生产技术、生产设备、标准介绍、电气控制、计量监测、分析测试、精细管理、技改交流和行业动态等。

本刊为国际大16开, 全部采用高档铜版纸彩色印刷, 每月10日出版。定价: 10元/期, 全年120元。全国各地邮局均可订阅, **邮发代号: 2-325**。

地址: 北京市朝阳区管庄东里 邮编: 100024 电话: 010-65767042 / 65765526 / 15011296713
投稿及全文下载: <http://www.cement.org.cn> E-mail: editor@cement.org.cn

欢迎订阅 欢迎投稿 欢迎刊登广告!



扫码订阅