

利废水泥熟料产品系统的生命周期清单分析方法及应用

邵亦白, 刘 宇, 郑 焱, 任品桥, 杜世伟

(北京工业大学 材料与制造学部, 北京 100124)

摘 要: 构建适用于利废产品系统的生命周期清单分析方法, 并以利用粉煤灰生产水泥熟料为例讨论各类方法的差异性。结果显示, 利用粉煤灰可减少水泥熟料的温室气体排放, 同时在一定程度上降低土地使用、化石资源消耗、矿物资源消耗影响; 使用废料负荷法计算得到的产品环境负荷最大, 而综合效益法在资源、能源与用地三项指标的计算结果最小。

关键词: 水泥熟料; 工业废物综合利用; 粉煤灰; 生命周期清单分析

中图分类号: TQ172.9

文献标识码: A

文章编号: 1671-8321(2022)11-0059-04

0 引言

2020年9月22日, 国家主席习近平在第七十五届联合国大会一般性辩论上发表重要讲话, 中国将提高国家自主贡献力度, 采取更加有力的政策和措施, 二氧化碳(CO₂)排放力争于2030年前达到峰值, 努力争取2060年前实现碳中和。水泥行业是我国工业领域温室气体排放的主要行业之一, 2009年水泥行业碳总排放为9.71亿t, 到2020年已攀升至13.75亿t, 约占全国碳排放总量的13%^[1], 且水泥熟料制造因碳酸盐矿石分解造成的碳排放占比高达50%以上, 深度减排难度巨大。随着碳中和碳达峰目标在水泥行业不断深入, 我国不仅对水泥行业产业结构进行调整, 也积极推动一批水泥行业的碳减排技术。其中利用工业固废替代原料技术既能实现水泥行业的碳减排, 又可以综合利用大量工业固废, 被广泛应用^[2]。2021年3月国家发改委联合九部门印发《关于“十四五”大宗固体废弃物综合利用的指导意见》, 该指导意见是“十四五”期间推动大宗固废综合利用、提高资源利用效率、降低碳排放实现碳达峰碳中和的重要文件^[3], 提出开展绿色设计、发展绿色矿业、开展重点行业绿色化改造、推动大宗固废产生过程自消纳、在工程建设领域推行绿色施工等途径实现大宗固废的源头减量、源头减碳。

随着利用工业固废替代原料技术在水泥行业的不断普及, 很多学者在专注提高固废综合利用率、保证水

泥性能的同时, 也开始思考利用工业固废对水泥熟料产品环境负荷的影响, 运用生命周期评价方法对综合利用工业固废生产水泥熟料进行资源-能源-环境影响综合评价的研究。Hossain等^[4]运用生命周期评价方法评估在香港生产的不同水泥熟料所消耗的能源与全球变暖潜在影响, 结果表明使用当地废弃玻璃瓶替代天然矿物生产熟料, 并将当地废弃木材所生产的生物燃料与煤炭共同作为燃料使用, 可减少香港水泥工业约12%的碳排放和15%的能源消耗。邓琪等^[5]对比天然矿物生产水泥与利用钢铁行业中的固废生产水泥之间的环境影响, 运用生命周期评价方法和物质流分析法对两种生产水泥工艺的环境负荷与物质能量代谢进行定量化的比较, 结果表明利用钢铁业固废生产的水泥各环境负荷均出现减少, 总负荷值下降6.93E-15, 利用钢铁业固废生产水泥对水泥行业绿色发展有积极意义。侯星宇等^[6]运用生命周期评价方法, 对水泥窑常规生产工艺和协同处置工业废弃物生产工艺的环境影响进行对比, 结果表明协同处置的环境影响优于常规生产, 前者较后者总环境影响潜力值下降2.94%, 其中影响最大的两项为全球变暖和人体毒性, 分别下降0.8%和1.8%。宋晓玲等^[7]对完全使用电石渣等工业固废作为原料生产水泥相关工艺拆解后建模, 运用生命周期评价方法评估其与传统水泥工艺的环境影响差异, 结果表明该工艺生产过程中的环境影响总值-0.004 5pt, 人体健康和生态系统两种环境影响

降低最为显著,该工艺对降低能耗,减少碳排放有积极作用。

通过上述文献可以看出对综合利用固废生产水泥熟料的环境影响已有较多研究,但现有研究针对综合利用固废产品系统的清单分析方法存在较大差异。本文针对综合利用工业固废生产水泥熟料对产品的温室气体排放及其它环境指标的影响开展研究,提出切分法、废料负荷法和综合效益法三种清单分析模型方法,以粉煤灰为例对比三种方法计算结果的差异,为水泥熟料综合利用固废技术温室气体减排潜力的科学定量提供方法支撑。

1 方法与数据

1.1 综合利用工业固废生产水泥熟料的生命周期清单分析模型

针对综合利用工业固废生产水泥熟料的工艺流程开展分析,固废利用行为涉及原料开采、燃料生产、上游系统(即产生固废的产品系统)、固废/原料运输、生料制备、熟料煅烧等环节。以粉煤灰为例(见图1),上游系统即为发电过程,该过程主产品是电力,废弃物包括脱硫石膏和粉煤灰,若粉煤灰被综合利用,将通过运输的方式进入水泥熟料系统成为其原料的一种,与其它原料、燃料一同进行生料的制备,再进入回转窑进行熟料的烧成,最终制成水泥熟料,且利用粉煤灰的同时将避免常规处置(堆砌)过程的各类环境影响。

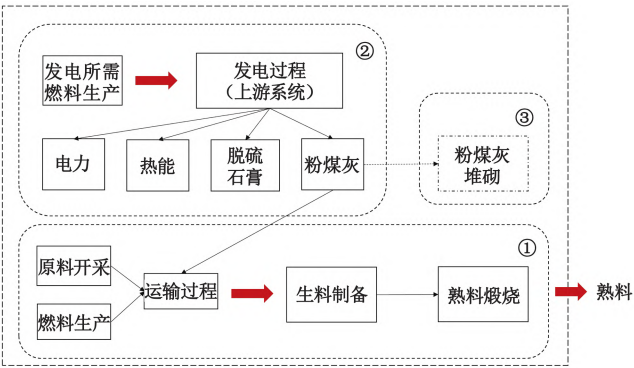


图1 综合利用工业固废生产水泥熟料工艺流程示意图

目前针对利废产品系统的生命周期清单分析模型包括切分法、废料负荷法与综合效益法三类,结合图2依次进行说明。

(1) 切分法:该方法将利废产品系统(系统B)视为上游产品系统(系统A)处置废弃物的手段,即在计算产品B的环境负荷时不考虑上游系统固废产生环节的环境

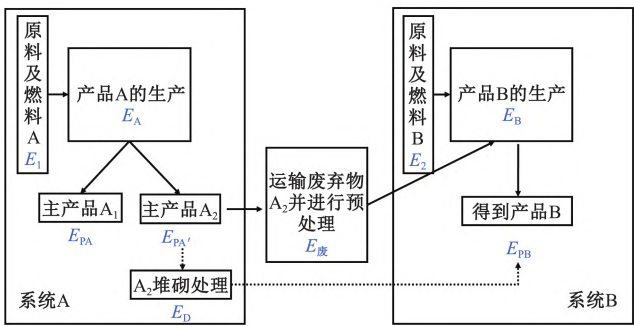


图2 综合利用工业固废生产水泥熟料的生命周期清单分析模型示意图

影响,仅考虑固废的运输与预处理、产品B其它原料/燃料的获取、以及产品B生产过程造成的环境影响,这是大部分研究所采取的清单建模方法,其计算公式如(1):

$$E_{PB} = E_2 + E_B + E_{废} \tag{1}$$

式中: E_{PB} 表示系统B中产品B的环境影响, E_2 表示用于生产产品B的原料/燃料的开采与加工过程的环境影响, E_B 表示系统B生产过程中产生的环境影响, $E_{废}$ 表示固废运输及预处理产生的环境影响。

(2) 废料负荷法:该方法将废弃物 A_2 视为系统A的副产品(需要承担系统A的环境负荷),需要确定系统A中主产品 A_1 与废弃物 A_2 的分配系数,将系统A中产生的环境排放、资源、能源消耗等分配到废弃物 A_2 中,再考虑废弃物 A_2 运输和预处理环节,以及产品B所需其它原料/燃料的获取过程和产品B生产过程本身的环境影响,其计算公式如(2)(3)所示:

$$E_{PB} = E_2 + E_B + E_{废} + E_{PA'} \tag{2}$$

$$E_{PA'} = \varphi \cdot (E_A + E_1) \tag{3}$$

式中: $E_{PA'}$ 表示系统A中废弃物 A_2 的环境影响, E_A 表示系统A生产过程的环境影响, φ 表示系统A中废弃物 A_2 的分配系数, E_1 表示用于生产产品A的原料/燃料获取过程的环境影响。

(3) 综合效益法:该方法在废料负荷法的基础上进一步考虑工业固废如果没有被利用一般会采用常规处置(如堆砌处理),将占用大量土地且会持续污染环境,而系统B利用废弃物的行为将避免固废堆砌造成的环境负荷,可以被视为环境效益,其计算公式如(4)所示:

$$E_{PB} = E_2 + E_B + E_{废} + E_{PA'} - E_D \tag{4}$$

式中: E_D 表示系统A中废弃物 A_2 常规处置过程所产生的环境影响。

1.2 功能单位与系统边界

以粉煤灰为例,采用上述三类方法对利用粉煤灰替



代天然矿物生产水泥熟料的产品系统进行生命周期清单分析,并评估固废综合利用技术实施的温室气体减排潜力及其它环境效益,对比时选取1t强度为52.5MPa的水泥熟料作为功能单位。

研究选取“从摇篮到大门”的系统边界,天然矿物生产水泥熟料产品系统包括原燃料的获取、运输以及水泥熟料生产过程,即图1中的①;综合利用粉煤灰生产水泥熟料系统边界还包括上游发电系统及避免的粉煤灰堆砌处置过程,即图1中①、②、③。

1.3 数据来源

水泥熟料生产过程的输入/输出数据取自两家生产规模与工艺水平相近的典型企业调研,其中A企业完全使用天然矿物制造水泥熟料,B企业利用粉煤灰(掺量4%)替代部分原料生产水泥熟料,两家企业水泥熟料生产过程的原料/能源消耗及污染物排放清单见表1所示。石灰石、黏土、砂岩等原材料的开采、能源生产、运输、粉煤灰堆砌处置等过程的清单数据来自Ecoinvent数据库;粉煤灰生产过程的生命周期清单数据取自文献^[8]。

表1 生产1t水泥熟料的生产过程数据		
清单项目	利用天然矿物生产熟料	综合利用粉煤灰生产熟料
石灰石/(t/t)	1.26E+00	1.28E+00
黏土/(t/t)	2.31E-01	—
砂岩/(t/t)	9.60E-02	1.09E-01
铁粉/(t/t)	—	5.10E-02
粉煤灰/(t/t)	—	6.00E-02
原煤/(kg/t)	1.61E+02	1.56E+02
电力/(kWh/t)	4.16E+01	3.84E+01
CO ₂ /(kg/t)	8.42E+02	8.36E+02
NO _x /(kg/t)	1.57E+00	1.44E+00
SO ₂ /(kg/t)	8.01E-01	7.73E-01
CO/(kg/t)	3.56E-01	3.40E-01
CH ₄ /(kg/t)	1.61E+00	1.56E+00
NM VOC/(kg/t)	1.42E-01	1.21E-01

1.4 影响评价方法体系

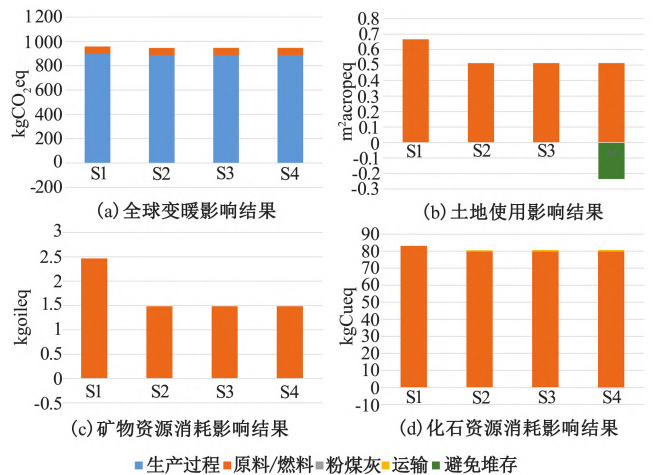
选取ReCiPe2016方法进行环境影响评价,该方法包括全球变暖、颗粒物形成、人体致癌毒性、矿物资源消耗、化石资源消耗、水资源消耗等18类中间点环境影响指标,以及生态系统破坏、人体健康损害等3类最终点损害指标。本文选取了其中4类中间点环境影响指标分别评估利废行为的节材(矿物资源消耗指标)、节能(化石能源消耗指标)、节土(土地使用指标)与温室气体减排潜力

(全球变暖指标),见表2所示。

表2 环境影响类型介绍	
环境影响类型	涉及物质
全球变暖/(kgCO ₂ eq)	CO ₂ 、CH ₄ 、N ₂ O
土地使用/(m ² a crop eq)	土地转换、土地占用
矿物资源消耗/(kg oil eq)	石灰石、砂岩、黏土、铁矿石
化石资源消耗/(kg Cu eq)	原煤、原油、天然气

2 结果与讨论

基于建立的固废综合利用产品系统的生命周期清单分析方法,分别计算采用天然矿物(不使用粉煤灰)制造水泥熟料与利用粉煤灰制造水泥熟料的各类环境影响,其中利用粉煤灰制造熟料分别使用切分法、废料负荷法和综合效益法三种生命周期清单分析方法。计算结果如图3所示。



S1-天然矿物制造熟料; S2-利用粉煤灰制造熟料(切分法); S3-利用粉煤灰制造熟料(废料负荷法); S4-利用粉煤灰制造熟料(综合效益法)

图3 不同模型计算得到水泥熟料各生产过程在不同影响指标中所占比例

结果显示,采用三种清单分析方法计算得到的综合利用粉煤灰生产水泥熟料系统的各项环境影响都优于天然矿物生产水泥熟料系统,利用粉煤灰后水泥熟料产品系统不仅温室气体排放有所下降,而且在其它环境影响中也产生了环境效益。主要原因为掺入粉煤灰可以改善生料易磨性,可降低3%~5%的熟料烧成热耗,减少煤和电力消耗,以及煤燃烧和电力生产过程的CO₂等温室气体物排放,对全球变暖指标也产生相应效益;掺入粉煤灰还替代黏土矿物,而黏土的在熟料产品矿物资源消耗指标中占据了较大比重(因为该指标考虑矿物资源的稀缺性,故黏土虽然消耗量较小但对该指标的贡献较大),利用粉煤灰后可减少

水泥熟料产品约40%的矿物资源消耗影响。

采用三种生命周期清单分析方法评估固废系统的计算结果存在一定差异。切分法计算的各项环境影响均小于废料负荷法, 原因为切分法没有考虑粉煤灰上游系统带来环境影响。综合效益法因考虑了避免常规废物处置, 在化石资源消耗、矿物资源消耗、土地使用中的计算结果最小, 体现了综合利用粉煤灰后避免常规处置的环境效益, 而避免堆存对温室气体排放(全球变暖指标)的影响不大, 因此其计算结果与切分法相比没有显著变化。

3 结论

本文讨论切分法、废料负荷法、综合效益法三类综合利用工业固废产品系统的生命周期清单分析方法, 并以利用粉煤灰生产水泥熟料为例, 验证并对比了三类方法, 主要结论如下:

(1) 利用粉煤灰替代原料可减少水泥熟料的生命周期温室气体排放, 采用切分法计算时较天然矿物生产熟料可减少1.09%的温室气体排放量, 而利用废料负荷法和综合效益法计算时, 温室气体排放分别减少1.02%和1.08%; 利用粉煤灰生产熟料在其它三类环境影响指标中也具有优势, 较天然矿物生产熟料可以降低2.88%~3.34%的化石资源消耗、39.89%~39.93%的矿物资源消耗以及22.97%~58.34%的土地使用影响。

(2) 三种生命周期清单分析模型中, 废料负荷法在切分法的基础上, 将废弃物视为上游流程的副产物, 考虑了废弃物在上游流程携带的环境影响, 其计算结果大于切分法; 综合效益法在废料负荷法的基础上, 额外考虑了避

免废弃物常规处置的环境效益, 其计算结果小于废料负荷法; 三类方法均可体现出固废行为带来的节材、节土等效益, 但废料负荷法与综合效益法需要科学确定上游流程主产品与固废原料的分配因子。

参考文献:

- [1]李琛.2021年水泥行业结构调整发展报告[J].中国水泥, 2022(1): 10-17.
- [2]罗雷, 郭晓阳, 李寅明, 张增寿, 朱廷钰.碳中和下水泥行业低碳发展技术路径及预测研究[J/OL].环境科学研究: 1-17[2022-05-04]. DOI: 10.13198/j.issn.1001-6929.2021.12.20.
- [3]中华人民共和国中央人民政府.关于“十四五”大宗固体废弃物综合利用的指导意见[EB/OL].http://www.gov.cn/zhengce/zhengceku/2021-03/25/content_5595566.htm.
- [4]Md.Uzzal Hossain, Chi Sun Poon, Irene M.C.Lo, Jack C.P. Cheng.Comparative LCA on using waste materials in the cement industry: A Hong Kong case study[J].Resources, Conservation & Recycling, 2017, 120.
- [5]邓琪, 陈吉宁.钢铁工业固废应用于水泥生产的降耗与减排[J].生态环境学报, 2012, 21(2): 298-302.DOI: 10.16258/j.cnki.1674-5906.2012.02.023.
- [6]侯星宇, 张芸, 戚昱, 蒋慧, 张琳, 曲殿利.水泥窑协同处置工业废弃物的生命周期评价[J].环境科学学报, 2015, 35(12): 4112-4119. DOI: 10.13671/j.hjkxxb.2015.0454.
- [7]宋晓玲, 梁智霖, 罗维, 黄东, 杨忠, 徐盼盼, 胡敬平, 侯慧杰, 刘冰川, 杨家宽.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.DOI: 10.13671/j.hjkxxb.2021.0276.
- [8]彭振国.典型工业固体废物的生命周期评价方法研究[D].北京工业大学, 2015. 10

