

水泥生命周期评价研究与实践

崔素萍, 黎瑶, 李琛, 王亚丽

(北京工业大学材料科学与工程学院, 北京 100124)

摘要: 水泥行业是我国重要的基础原材料行业之一, 其广泛地应用于建筑、国防、道路等领域。随着可持续发展的不断推进, 我国水泥行业正处于从高能耗、高污染的集约型生产向环境友好型发展模式的转型时期。基于生命周期评价方法, 建立了适用于水泥生产流程的环境影响评价指标体系和方法步骤, 介绍了据此开展的新型干法水泥生产流程环境负荷热点辨识和工艺优化效果评价研究, 进一步定量评价并比较了水泥窑协同处置污泥、生活垃圾以及工业废物替代原料的技术方案, 为实现水泥生产流程环境负荷的科学定量与低环境负荷利废水泥的生态设计与应用提供方法与数据支撑。

关键词: 生命周期评价; 生态水泥; 节能减排

中图分类号: TU525; X820.3 **文献标识码:** A **文章编号:** 1674-3962(2016)10-0761-08

Research and Application of Life Cycle Assessment in Cement Industry

CUI Suping, LI Yao, LI Chen, WANG Yali

(College of Materials Science and Engineering, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China)

Abstract: As one of the important basic raw material industries in China, cement is widely used in construction, national defense, roads and other fields. Along with the continuous progress of the sustainable development, cement industry is under the change stage from the intensive production of high energy consumption and high pollution to the environment friendly development mode. In this study, an environmental impact assessment index system and procedures based on Life Cycle Assessment method were established, which suit for cement production process. The research of environmental impact hotspot identification and process optimization effect evaluation on the new dry cement production process was introduced. Moreover, quantitative evaluation and comparison for technology solutions of the cement kiln co-disposal of sludge and household garbage, as well as industrial waste in place of raw materials were carried out in order to provide guidance for accurate quantification of environmental burden in cement production process and eco-design of environment friendly waste-based cement.

Key words: life cycle assessment; eco-cement; energy-saving and emission-reduction

1 前言

面临产能过剩、转型发展的严酷形势, 我国水泥工业正逐步向注重资源效率、能源效率和环境保护的生态型发展^[1]。除了优质、高效、节能外, 生态化发展对水泥工业环境影响指标更为关注^[2], 传统经典的理论方法已经不能满足需要, 而生命周期评价方法(Life Cycle

Assessment, LCA)可以很好地解决这些问题。LCA方法在材料中的应用, 是基于性能需求对材料产品或系统的环境影响进行综合、系统的分析, 获得定量结果, 帮助辨识流程中环境负荷重点工序、优选技术改进方案、研制开发先进技术, 指导节能减排^[3]。本文主要介绍LCA在水泥生产过程环境负荷分析及优化中的研究与应用。

2 水泥生产流程LCA与环境热点辨识

2.1 水泥生产流程的LCA方法与步骤

LCA是系统化、定量化分析和评价产品及其生产流程综合环境负荷的方法, 也是辨识环境问题、优化改进方案、实现节能减排的重要手段^[4]。针对具体的产品和流程, 建立基于LCA的环境影响计算和分析方法, 是开

收稿日期: 2016-02-17

基金项目: 北京市自然科学基金重点项目(2141001); 北京市自然科学基金(2164056)

第一作者: 崔素萍, 女, 1964年生, 教授, 博士生导师,

Email: cuisuping@bjut.edu.cn

DOI: 10.7502/j.issn.1674-3962.2016.10.01

展环境热点辨识的重要基础。按照 ISO14040 规定的技术框架^[5]，水泥 LCA 分析按图 1 步骤进行。

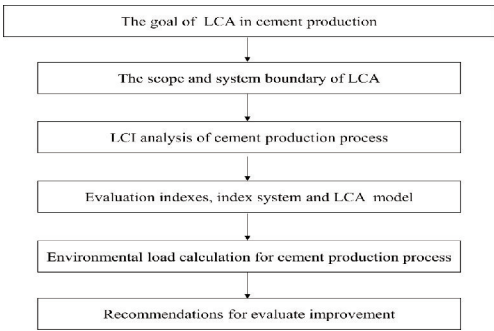


图 1 水泥 LCA 分析步骤

Fig. 1 Procedure of cement life cycle assessment

在生命周期分析目的明确后，需要确定评价范围、边界，以及重要的环境影响类别，具体到水泥生产过程，评价范围主要包括生料制备、熟料煅烧和水泥粉磨三个工序，边界确定为从原料获得到产品出厂前的整个过程，涉及到的资源、能源消耗和污染物排放见表 1。

表 1 水泥生产生命周期主要环境问题

Table 1 Environmental impacts caused by cement production

Environmental index	Resource consumption and environmental emissions
Resource consumption	limestone, gypsum, sandstone, iron powder
Energy consumption	coal, electricity, fuel oil
Pollutant emissions	CO ₂ , CO, SO ₂ , NO _x , HF, HCl, dust, heavy metals, phosphate, nitrate

清单分析以及有效数据收集是 LCA 的基础工作^[5]，对于水泥生产过程，生命周期环境影响评价所需基础数据包括原料消耗（石灰石、粘土质原料、铁质校正原料、硅质校正原料、石膏、混合材、废弃物）、能源消耗（煤、电）、污染物排放（CO₂、CO、NO_x、SO_x、HCl、HF、Hg、As、Cr、Cu、Pb、Zn、Cd、Ni、粉尘）。

根据水泥生产特点选择影响类型用于评价，见表 2 所示。水泥生产的物质输入为天然矿物如石灰石、砂岩

等，能量输入为热能和电能，而热能、电能均可以转化为煤炭、石油、天然气等化石能源，表现的环境影响类别为不可再生资源消耗（ADP）；水泥生产对环境输出主要是废气，其中含有 CO₂、SO₂、NO_x 等，选择与上述气体排放相关的影响类型，包括温室效应（GWP）、环境酸化（AP）、人体健康损害（HTP）、光化学烟雾（POCP）；水泥生产废水数量很少，并且通常仅含有少量悬浮物和油污，无毒无害，废水污染在此不作考虑。

表 2 水泥生产的环境影响类型和类型参数

Table 2 Environmental impact indicators of cement production

Environmental impact categories	Environmental load projects	Parameter index and units
ADP	coal, oil, natural gas, limestone, gypsum, sandstone	Sb. eq
GWP	CO ₂	CO ₂ . eq
AP	SO ₂ , NO _x , HCl, HF	SO ₂ . eq
HTP	SO ₂ , NO _x , dust, HF	1,4-DCB. eq
POCP	SO ₂ , NO _x , CO	C ₂ H ₄ . eq

环境影响类型参数特征化计算，是 LCA 分析中对不同环境负荷项目所造成的环境影响进行对比分析和量化的过程，采用特征化因子将生命周期清单结果转换成统一的单位并进行合并，得到水泥生产的各类环境影响潜力值^[5]。最终通过结果解释对量化分析结果进行归纳形成结论和建议。

2.2 水泥生产流程综合环境负荷分析与热点辨识

以某新型干法水泥生产系统为例，进行生产流程综合环境负荷分析。该生产系统主要产品是普通硅酸盐水泥，选取 1 kg 42.5 普通硅酸盐水泥为功能单位。研究范围包括生料制备（原料开采、原料预均化、生料粉磨、生料均化）、熟料煅烧（包括煤粉制备）、水泥粉磨三个主要工序，并且考虑了与水泥生产相关的原料开采、电力生产和煤炭生产过程产生的环境负荷。根据前文构建的评价方法体系，计算得到功能单位水泥的环境负荷清单和特征化结果，见表 3 与表 4 所示。

表 3 功能单位水泥的生命周期清单 (kg/kg)

Table 3 LCI of cement

	Flows	Mining	Raw material pre-homogenization	Raw meal grinding	Raw meal homogenization	Clinker incineration	Coal preparation	Cement grinding
Resource	Limestone			1.06E+00				
	Sandstone			9.04E−02				
	Iron powder			6.16E−02				
	Bauxite			6.53E−02				
	Gypsum			7.61E−02				
Energy	Coal	2.13E−01	6.77E−04	1.17E−02	4.96E−04	1.40E−01	4.52E−03	2.38E−02

		续表						
Flows		Mining	Raw material pre-homogenization	Raw meal grinding	Raw meal homogenization	Clinker incineration	Coal preparation	Cement grinding
Emissions	CO ₂	8.65E-02	1.32E-03	2.27E-02	9.65E-04	6.80E-01	8.79E-03	4.62E-02
	NO _x	1.44E-03	8.67E-06	1.50E-04	6.39E-06	1.43E-03	5.82E-05	3.06E-04
	SO ₂	6.52E-04	6.46E-06	1.12E-04	4.75E-06	1.19E-03	4.33E-05	2.28E-04
	CO	1.29E-04	1.76E-06	3.03E-05	1.29E-06	3.54E-04	1.17E-05	6.18E-05
	dust	7.41E-04	9.04E-06	1.59E-04	7.40E-06	2.41E-04	1.33E-04	2.32E-02

表 4 功能单位水泥的环境影响特征化结果
Table 4 LCIA result of cement

Environmental impact categories		Mining	Raw material pre-homogenization	Raw meal grinding	Raw meal homogenization	Clinker incineration	Coal preparation	Cement grinding
ADP		4.54E-02	1.20E-04	2.11E-03	8.99E-05	1.81E+00	8.18E-04	2.55E-02
GWP		8.65E-02	1.32E-03	2.27E-02	9.65E-04	6.80E-01	8.79E-03	4.62E-02
AP		9.48E-04	6.60E-06	1.14E-04	4.86E-06	1.13E-03	4.42E-05	2.33E-04
HTP		1.07E-03	1.17E-05	2.05E-04	9.22E-06	9.79E-04	1.38E-04	1.92E-02
POCP		1.26E-05	1.38E-07	2.38E-06	1.01E-07	2.62E-05	9.23E-07	4.86E-06

结果显示，水泥生产流程环境影响由大到小顺序依次为温室效应、不可再生资源消耗、环境酸化、人体健康损害、光化学烟雾，而排在前两位的温室效应和不可再生资源消耗的主要贡献工序是熟料煅烧，节能减排潜力很大，将此工序作为节能减排改造的首选重点工序。提高该工序矿物原料和化石燃料利用效率、或者降低该工序矿物原料和化石燃料的消耗量、减少该工序热工系统的物料损失和热损失，是降低该工序综合环境负荷的主要途径。

3 重点工序工艺优化降低环境负荷效果评价

针对上述水泥生产流程综合环境负荷分析结果，企业通过对重点工序改进实现环境负荷的降低，包括采用钢渣替代水泥原料^[6]、预热分解系统和余热发电改进等。研究确定并实施了钢渣与其它原料分磨后混工艺，保证不同易磨性原料都能够达到合理的细度^[7-8]，最大程度地发挥各自活性，进一步降低熟料烧成热耗，钢渣的利用量增加 60%。针对各级旋风筒进口风速相对较高、出口风速很低、系统的预热器尤其是一级筒的分离效率不够理想、系统飞灰量大、出预热器废气温度过高等系统烧成热耗偏高的原因，通过改进一级筒内筒结构、

调整三、四级筒进口结构、撒料盒前端增加导流板便于悬浮热交换、调整窑尾烟室局部和缩口结构，以及进行了操作参数优化调整等，提高了预热器尤其是一级筒的分离效率，降低了出预热器的废气温度和飞灰量，增强了各级气固热交换，降低了系统阻力；分解炉燃烧状况大大改善，预燃室的预燃功能得到了较好的发挥；同时对冷却机操作参数进行了调整，改善了冷却机冷却效果；从系统总体来看，系统各项性能都得到了提高。预热器分离效果有所改善，一级筒出口温度降了 20℃左右，系统阻力明显下降。一级筒分离效率由 90.14% 上升到 95.20%，系统分离效率由 89.13% 增加到 94.07%。对系统实施了余热发电改造，降低了系统热量损失^[9]。

采用前文构建的指标体系计算得到工艺优化后功能单位水泥的生命周期清单和环境负荷特征化结果，见表 5 与表 6 所示。与改进前相比，水泥生产过程综合环境负荷降低幅度如表 7 所示。通过基于 LCA 的定量分析方法，不仅可以从能源系统改造计算出能耗的降低，还可以从全系统的角度定量计算出与能耗有关联的资源消耗、污染物排放的变化结果，避免了孤立研究资源、能源及污染排放的弊病，能够系统地指导工业过程节能减排综合改造，同时实现节能、减排和降低资源消耗。

表 5 改进后功能单位水泥生产的 LCA 清单 (kg/kg)
Table 5 LCI of cement after improvement

Flows		Raw materials mining	Raw material pre-homogenization	Raw meal grinding	Raw meal homogenization	Clinker incineration	Cement grinding
Resource	Limestone			1.05E+00			3.24E-02
	Sandstone			7.08E-02			
	Iron powder			1.95E-02			
	Bauxite			7.62E-02			
	Gypsum			3.92E-02			
	Fly ash			2.27E-02			
	Slag						8.36E-02
Energy	Coal	1.07E-01	3.82E-04	7.65E-03	3.59E-04	1.17E-01	2.04E-02
	CO ₂	8.27E-03	9.15E-04	1.83E-02	8.60E-04	2.80E-01	3.49E-02
	NO _x	1.06E-03	3.80E-06	7.61E-05	3.57E-06	1.16E-03	2.03E-04
Emissions	SO ₂	2.25E-04	8.02E-07	1.61E-05	7.54E-07	2.46E-04	4.28E-05
	CO	6.27E-06	1.19E-06	2.38E-05	1.11E-06	2.59E-04	4.53E-05
	Dust	3.47E-05	1.24E-07	2.48E-06	1.16E-07	9.70E-05	1.67E-05

表 6 技术改造后水泥生产过程的环境负荷
Table 6 LCIA result of cement after improvement

Environmental impact categories	Raw materials mining	Raw material pre-homogenization	Raw meal grinding	Raw meal homogenization	Clinker incineration	Cement grinding
ADP	2.14E-03	7.64E-06	1.53E-04	7.18E-06	1.77E+00	9.80E-03
GWP	1.07E-01	9.15E-04	1.83E-02	8.60E-04	4.80E-01	4.88E-02
AP	4.84E-04	1.73E-06	3.47E-05	1.63E-06	9.29E-04	9.25E-05
HTP	6.75E-04	2.42E-06	4.85E-05	2.27E-06	2.40E-04	1.47E-02
POCP	1.50E-05	8.53E-08	1.71E-06	8.00E-08	2.40E-05	4.55E-06

表 7 技术改造后水泥生产综合环境负荷降低幅度

Table 7 Comprehensive environmental load reduction range of cement after technical improvement

Environmental impact categories	Comprehensive environmental load reduction range in the process
ADP	5.37%
GWP	21.48%
AP	35.99%
HTP	26.87%
POCP	2.43%

4 工业废渣替代原料技术方案评价

工业废渣在水泥生产中的综合利用方式可以分为替代生料与替代熟料两类，可替代生料的工业废渣有电石渣^[10]、煤矸石^[11]、粉煤灰^[12]等，可替代熟料的工业废渣主要是粉煤灰、矿渣^[13]。采用 LCA 可以计算出水泥窑利用每吨工业废渣带来的环境效益，并据此对不同技术路线的节能、节地、碳减排、非温室气体减排与整体环境影响进行评价，作为技术选择的依据。利用每吨固体废弃物替代生料或熟料产生的各类环境效益的效果排序，见表 8 所示。

表 8 各类工业废渣利用的环境效益排序

Table 8 Rank of environmental benefits potential of different kinds of waste utilization

Environmental benefits	Best	Second	Third
Carbon emission reduction	Fly ash replace clinker	Slag replace clinker	Carbide slag replace raw meal
Fossil energy saving	Coal gangue replace raw meal	Fly ash replace clinker	Slag replace clinker
Land saving	Fly ash replace raw meal	Fly ash replace clinker	Carbide slag replace raw meal
Resource saving	Coal gangue replace raw meal	Fly ash replace raw meal	Fly ash replace clinker
Non-greenhouse gas emissions reduction	Fly ash replace clinker	Slag replace clinker	80% watery sludge replace raw meal

结果显示：在碳排放方面，工业废渣替代熟料的碳减排效果明显优于替代生料，在替代熟料中粉煤灰的碳减排效果较好，替代生料中电石渣的碳减排效果最为显著，煤矸石替代生料则会增加碳排放。在化石能源消耗方面，煤矸石替代生料的节能效果显著达到 162 kgce/t，两种废渣替代熟料的节能效果次之为 144 kgce/t，而电石渣替代生料由于增加了压滤与干化等原料的处置过程，能源消耗增加了 30.9 kgce/t；在节约土地方面，由于各类废弃物利用形式均避免了废弃阶段的填埋或是堆积占地，且均替代了部分自然资源，从而降低了资源开采占地，故研究涉及的 7 种废弃物利用均具有一定的节地效果，其中粉煤灰替代生料的节地效果最为明显，为

0.264 m²/t。在非温室气体减排方面，利用粉煤灰替代熟料的减排效果最好；另一方面，利用电石渣由于能源消耗的增加使得非温室气体排放增加。

综合考虑温室气体排放、资源消耗、人体健康损害、富营养化、光化学烟雾、酸化与土地使用 7 项环境影响指标，计算了每种废物利用方案的综合环境影响下降值，见图 2 所示。结果显示，替代熟料所产生的环境效益明显高于替代生料，而在五类生料替代技术中，处理 80% 含水污泥由于利用余热节约了大量干化能耗，减少了干化过程的直接污染物排放，故其环境效益要优于其他四类方式，另一方面，煤矸石与 35% 含水污泥替代生料的环境效益并不十分显著。

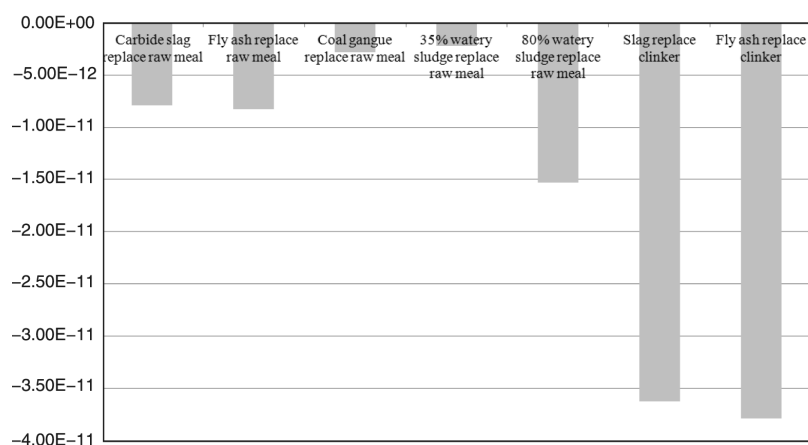


图 2 不同技术路线的环境影响计算结果

Fig. 2 LCIA result of different industrial waste utilization scenario

5 水泥窑协同处置生活垃圾技术方案评价

我国生活垃圾的无害化处置方式主要为卫生填埋、焚烧与堆肥等，所占比例分别为 82.4%，4.7% 和 12.9%^[14]，近年来水泥窑协同处置正在成为生活垃圾无害化的又一重要途径^[15]。本文采用生命周期分析方法，计算获得了水泥窑分类综合处置、水泥窑直接处置、焚烧后水泥窑处置、以及传统的卫生填埋和焚烧后填埋等

生活垃圾不同处理路线的环境负荷。研究框架图和系统边界见图 3 所示。

研究的系统边界涵盖生活垃圾处置的主要相关过程，其中不仅包括垃圾处置过程本身的直接能耗与排放，而且包含处置过程中使用的资源与能源的开采过程以及运输等过程的间接影响，更为系统与全面地分析水泥窑协同处置生活垃圾与传统的生活垃圾无害化处置方式相比的优势所在，研究的系统边界见图 4 所示。

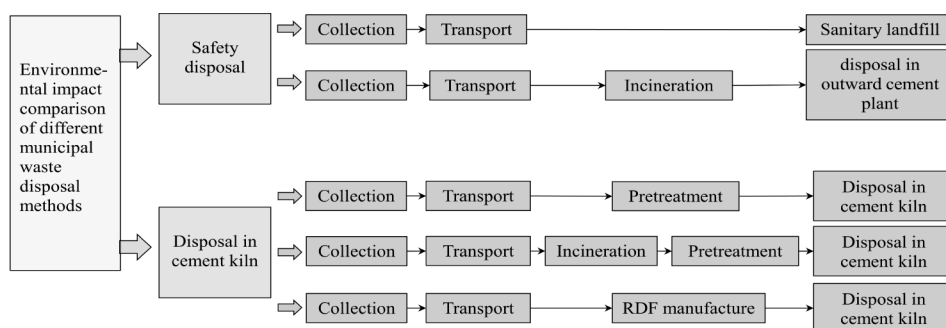


图 3 城市垃圾的不同处置路线

Fig. 3 Different scenario of garbage treatment

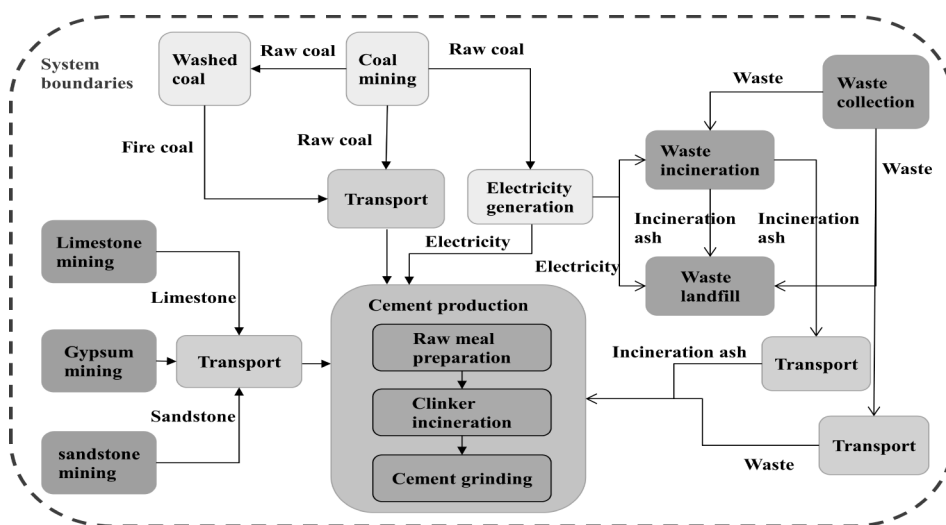


图 4 水泥窑协同处置城市垃圾生命周期分析的系统边界

Fig. 4 System boundary of cement kiln synergy disposal of municipal waste

各类生活垃圾处理技术路线的环境负荷对比研究结果显示（图 5 与图 6），水泥窑处置生活垃圾相对于传统处置方式的优势集中体现在节材、节土、特别是人体健

康损害潜力的大幅下降，避免了垃圾焚烧过程的二噁英排放与填埋过程的重金属物质渗出对空气、土壤以及水体的污染，三种水泥窑处置路线的人体健康损害影响，

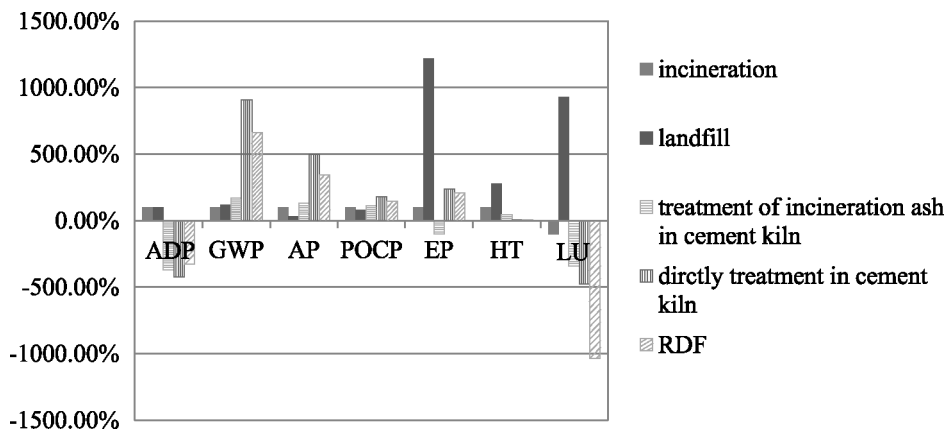


图 5 不同生活垃圾处理技术路线的环境负荷计算结果

Fig. 5 LCIA result of different garbage treatment/utilization scenario

仅为传统填埋处置方式的 16.7%、2.11% 与 2.13%。综合考虑资源消耗、全球变暖、人体健康损害等多项环境影响,采用水泥窑处置城市垃圾造成的环境影响要远低于传统的无害化处理模式,采用焚烧后水泥窑处置、直接水泥窑处置与水泥窑分类综合处置的环境影响,分别为填埋处置方式的 16.89%、2.81% 与

2.21%,是垃圾直接焚烧处置方式的 46.7%、7.8% 与 6.1%。在 3 种水泥窑协同处置技术线路中,水泥窑分类综合处置(RDF)的环境影响最小,直接处置方式的环境影响值次之,与先焚烧后处置方式相比,分类综合处置环境负荷降低 86.9%,水泥窑直接处置的环境负荷降低 83.3%。

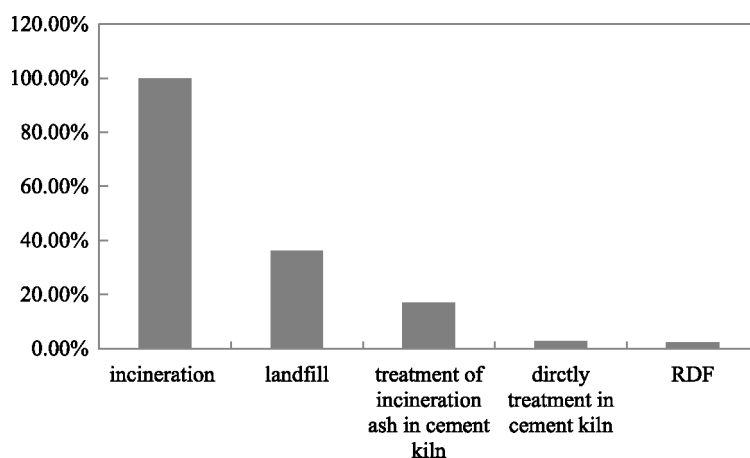


图 6 不同生活垃圾处理技术路线的环境负荷比较

Fig. 6 Weighting result of different garbage treatment/utilization scenario

6 水泥窑协同处置城市污泥技术方案评价

目前城市污泥的主要处置方法包括填埋、焚烧、土地利用、以及近年发展起来的水泥窑协同处置^[16]。水泥窑协同处置的方式又可分为脱水后外运水泥厂处置、石灰稳定后外运水泥厂处置等^[17]。不同的处置技术路线如

图 7 所示。

基于 LCA 方法,从环境影响角度对不同的技术路线进行评价,考虑的影响类别包括温室效应(GWP)、酸化效应(AP)、光化学效应(POCP)、水体富营养化(EP)、人体健康损害(HTP)和不可再生资源消耗(ADP)等,计算结果见表 9。

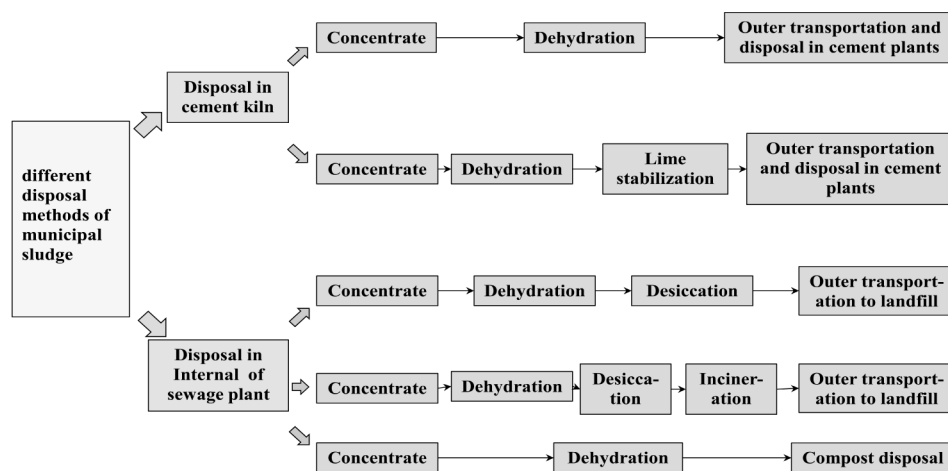


图 7 城市污泥的不同处置路线

Fig. 7 Different scenario of sludge treatment

表 9 不同污泥处置方式的环境影响计算结果
Table 9 LCIA result of different sludge utilization way

Environmental impact categories	Dehydration-cement plant	Lime-cement plant	Desiccation-landfill	Incineration-landfill	Compost
GWP	4.53E-13	4.91E-13	4.24E-12	4.48E-12	3.64E-12
AP	3.04E-13	4.12E-13	2.21E-12	2.16E-12	1.89E-12
POCP	9.81E-15	1.41E-14	6.53E-14	6.21E-14	5.60E-14
EP	1.27E-13	1.81E-13	8.61E-13	8.23E-13	7.38E-13
HTP	1.58E-12	1.45E-12	1.68E-11	1.82E-11	1.44E-11
ADP	7.71E-15	1.51E-14	2.01E-14	7.93E-15	1.72E-14
Total	2.48E-12	2.56E-12	2.42E-11	2.57E-11	2.07E-11

计算结果显示,“脱水-外运水泥厂处置”路线,即城市污泥在污水厂进行机械脱水到含水率 80%,再运往水泥厂进行协同处置是综合环境影响最低的技术方案,这种方式不仅可以有效减少臭气,将重金属固化于水泥熟料,避免二次污染,并且借助水泥窑余热利用技术,相对于在污水处理厂内部进行干化和焚烧更能有效利用城市污泥中的热值;“脱水-石灰稳定-外运水泥厂处置”路线的环境影响略高于“脱水-外运水泥厂处置”路线,但是这种方式经济成本较高,目前还未普及;在传统的处置路线中,“焚烧-填埋”处置城市污泥的方式带来的环境影响最高,是水泥厂协同处置城市污泥造成环境影响的 10.37 倍,“干化-填埋”与“堆肥”方式带来的环境影响也分别是水泥厂协同处置城市污泥的 9.74 倍与 8.35 倍。水泥厂协同处置城市污泥相对于在污水处理厂直接处置具有较为明显的环境优势。

7 结 论

本文针对新型干法水泥生产流程,建立了适用于水泥产品的 LCA 方法体系,确定了主要的环境影响类别,开展了面向工序的环境负荷热点辨识和工艺优化效果评价,通过重点工序优化降低不可再生资源消耗 5%、温室效应 21%;比较了工业废渣替代原料的不同技术方案,结果显示,以粉煤灰替代熟料的综合环境效益最好,电石渣替代石灰石的碳减排效果最好,而煤矸石在水泥生产中利用的环境效益并不明显;评价了水泥窑协同处置污泥和生活垃圾的不同技术方案,结果显示,水泥窑直接处置 80% 含水率污泥、水泥窑分类综合处置生活垃圾(RDF 替代燃料)的环境效益较好。

参考文献 References

[1] Gao Changming (高长明). *Cement Guide for New Epoch* (新世纪水泥导报) [J], 2011 (3): 3-6.
[2] Cai Jie (蔡捷), Li Xiaojing (李晓静), Jiang Yingwu (姜英武),

et al. Value Engineering (价值工程) [J], 2015 (5): 23-25.
[3] Yang Jianxin (杨建新), Xu Cheng (徐成), Wang Rusong (王如松). 产品生命周期评价方法及其应用 [M]. Beijing: China Meteorological Press, 2002.
[4] ISO International Standard 14044. Environmental Management—Life Cycle Assessment—Requirements and Guidelines 2006 (E).
[5] ISO International Standard 14040. Environmental Management—Life Cycle Assessment—Principles and Framework. 2006 (E).
[6] Prusinski J R, Marceau M L, VanGeem M G. Life Cycle Inventory of Slag Cement Concrete [C] // *Proceedings of the 8th International Conference on Fly Ash, Silica Fume, Slag and Natural Pozzolans in Concrete*. CANMET/ACI. 2006: 1-26.
[7] Chen Quanyuan (陈泉源), Liu Huanhuan (柳欢欢). *Mining and Metallurgical Engineering* (矿业工程) [J], 2007, 27 (3): 49-56.
[8] Zhou Hong (周红). *Shanxi Science and Technology* (山西科技) [J], 2011, 26 (1): 96-97.
[9] Engin T, Ari V. *Energy Conversion and Management* [J], 2005 (46): 551-562.
[10] Shi Feifei (史菲菲). *Dissertation for Master* (硕士论文) [D]. Beijing: Beijing University of Technology, 2013.
[11] Chen Deqian (陈德谦), Jiang Guanghua (蒋光华), Zhao Mingrong (赵明荣). *Cement* (水泥) [J], 2013 (5): 23-24.
[12] He Raohai (何饶海), Guo Xinjie (郭新杰), Kang Xiaozhen (康小珍). *Cement Engineering* (水泥工程) [J], 2009 (2): 25-27.
[13] Liao Zhiming (廖志明), Zhong Jinghua (钟靖华), Bi Zhensheng (闭振升). *DA ZHONG KE JI* (大众科技) [J], 2009 (10): 029.
[14] Su Yong (苏勇). *Resources Economization & Environment Protection* (资源节约与环保) [J], 2014 (3): 158.
[15] He Jie (何捷), Li Yeqing (李叶青), Xiao Ying (萧瑛), *et al. China Cement* (中国水泥) [J], 2014 (9): 69-71.
[16] Hong J, Hong J, Otaki M, *et al. Waste Management* [J], 2009 (29): 696-703.
[17] Zhang J, Liu J, Li C, *et al. Journal of Hazardous Materials* [J], 2009 (165): 1179-1185.

(编辑 惠琼)