

文章编号:1007-9629(2024)04-0299-10

# 水泥窑协同处置 MSW 环境负荷与性能耦合评价

李寅雪<sup>1,2</sup>, 刘卓霖<sup>3</sup>, 任兵建<sup>3</sup>, 陶从喜<sup>4</sup>, 郭晓璐<sup>1,2,\*</sup>

(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; 3. 华润水泥技术研发有限公司, 广东 广州 510460;  
4. 华润水泥技术研发(广西)有限公司, 广西 南宁 530409)

**摘要:** 基于中国某水泥厂 2022~2023 年生产数据及近 3 年国家/行业统计数据进行生命周期评价, 核算水泥窑协同处置城市生活垃圾(MSW)生产不同品种水泥的环境负荷; 联合数据质量指标评估和蒙特卡洛模拟来综合评估最终结果的不确定度. 与常规工艺相比, 水泥窑协同处置工艺生产每吨熟料的综合环境负荷降幅为 7.82%; 4 种水泥中, P·O 52.5 水泥的综合环境负荷最大, 但其单位强度的环境负荷相对较小. 综合考虑, 采用水泥窑协同处置工艺生产 P·C 42.5 水泥与采用常规工艺生产 P·O 42.5 水泥相比, 其综合环境负荷降幅为 16.87%.

**关键词:** 生命周期评价(LCA); 协同处置; 城市生活垃圾(MSW); 水泥性能; 蒙特卡洛模拟

中图分类号: TU525.9

文献标志码: A

doi: 10.3969/j.issn.1007-9629.2024.04.003

## Coupling Evaluation of Environmental Load and Mechanical Properties for Co-processing of MSW in Cement Kiln

LI Yinxue<sup>1,2</sup>, LIU Zhuolin<sup>3</sup>, REN Bingjian<sup>3</sup>, TAO Congxi<sup>4</sup>, GUO Xiaolu<sup>1,2,\*</sup>

(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; ,  
3. China Resources Cement Technology R&D Co., Ltd., Guangzhou 510460, China; 4. China Resources Cement Technology R&D (Guangxi) Co., Ltd., Nanning 530409, China)

**Abstract:** Based on the production data from 2022 to 2023 in a typical plant in China and national and industrial statistics from the past three years, a life cycle assessment (LCA) was conducted for cement production. The environmental load of co-processing of municipal solid waste (MSW) in cement kiln was calculated, and the differences in environmental load per unit strength of different cements were compared. Moreover, the uncertainty of the LCA result was evaluated by data quality indicator and Monte Carlo simulation. Compared with conventional production, the integrated environmental load indicator of one ton of clinker was reduced by 7.82% in the co-processing production. Among the four types of cement, Portland cement P·O 52.5 had the highest integrated environmental load indicator, but its environmental load per unit strength was relatively smaller. Compared with the production of Portland cement P·O 42.5 by conventional clinker production, the integrated environmental load indicator of the production of Portland cement P·C 42.5 by co-processing production was reduced by 16.87%.

**Key words:** life cycle assessment (LCA); co-processing; municipal solid waste (MSW); cement property; Monte Carlo simulation

收稿日期: 2023-05-12; 修订日期: 2023-11-09

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, 52242807); 中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(22120220599, 2023-2-YB-20)

第一作者: 李寅雪(1998—), 女, 山西运城人, 同济大学硕士生. E-mail: liyinxue981121@163.com

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

水泥窑协同处置技术将高温处置固体废弃物与水泥熟料煅烧相结合,以固废作为替代性原料和燃料,不仅节约水泥生产资源及能源消耗,还可实现固废无害化处置,这对推动固废资源化以及水泥行业可持续发展具有重要意义和环保价值。

近年来,中国城市生活垃圾(MSW)的产生量急剧增加,2021年其清运量达2.49亿t<sup>[1]</sup>,MSW的科学合理处置已迫在眉睫。相较于传统填埋法或焚烧法,水泥窑协同处置技术可有效避免对土壤的二次污染<sup>[2]</sup>和垃圾焚烧后剩余灰渣的处理问题<sup>[3]</sup>,且能有效抑制垃圾焚烧过程中的二噁英排放<sup>[4]</sup>,是一种综合优势明显的处置方法。

生命周期评价(LCA)目前已广泛应用于水泥生产<sup>[5-6]</sup>及废弃物处置<sup>[7]</sup>的环境评价。然而,现有LCA研究的环境负荷评估中多将MSW制成垃圾衍生燃料<sup>[8]</sup>,或将生活垃圾焚烧飞灰作为水泥生产替代性原料<sup>[9-10]</sup>。关于水泥窑协同处置MSW的环境分析,目前多集中于从固废处置的角度,以1t MSW为单位,对比不同MSW处置手段的环境负荷差异<sup>[7]</sup>;而从水泥全生命周期生产流程来分析水泥窑协同处置MSW的生命周期评价则相对较少。

基于此,本研究以国内某水泥厂2022~2023年生产数据及近3年国家/行业统计数据为基础进行

生命周期评价。首先,选取1t熟料为单位,核算水泥窑协同处置MSW的环境负荷降幅;选取1t水泥为单位,结合力学性能,对比不同水泥品种及其单位强度下的环境负荷;最后,将数据质量指标评估和蒙特卡洛模拟相结合,对LCA结果进行不确定度评估,以期MSW无害化处置及水泥行业降碳减污提供理论依据。

## 1 水泥生命周期评价模型及算法

采用生命周期评价方法<sup>[5]</sup>定量评估水泥窑协同处置MSW全生命周期的综合环境负荷,识别对环境影响严重的主要因素,寻求更为有效的降碳减污节能措施。

### 1.1 目标和范围的确定

以国内某典型水泥窑协同处置MSW生产厂为例,该厂拥有一条日产4500t水泥熟料的新型干法生产线,城市生活垃圾无害化日处理量可达500t。分别选取1t熟料和1t不同品种的水泥作为研究的单位,系统边界涉及原料开采(I)及运输(II)、生料制备(III)、煤粉制备(IV)、熟料煅烧(V)、水泥制备(VI)(包括水泥粉磨及包装)以及相关能源生产(煤炭开采及电力生产等)和余热回收发电过程,如图1所示。

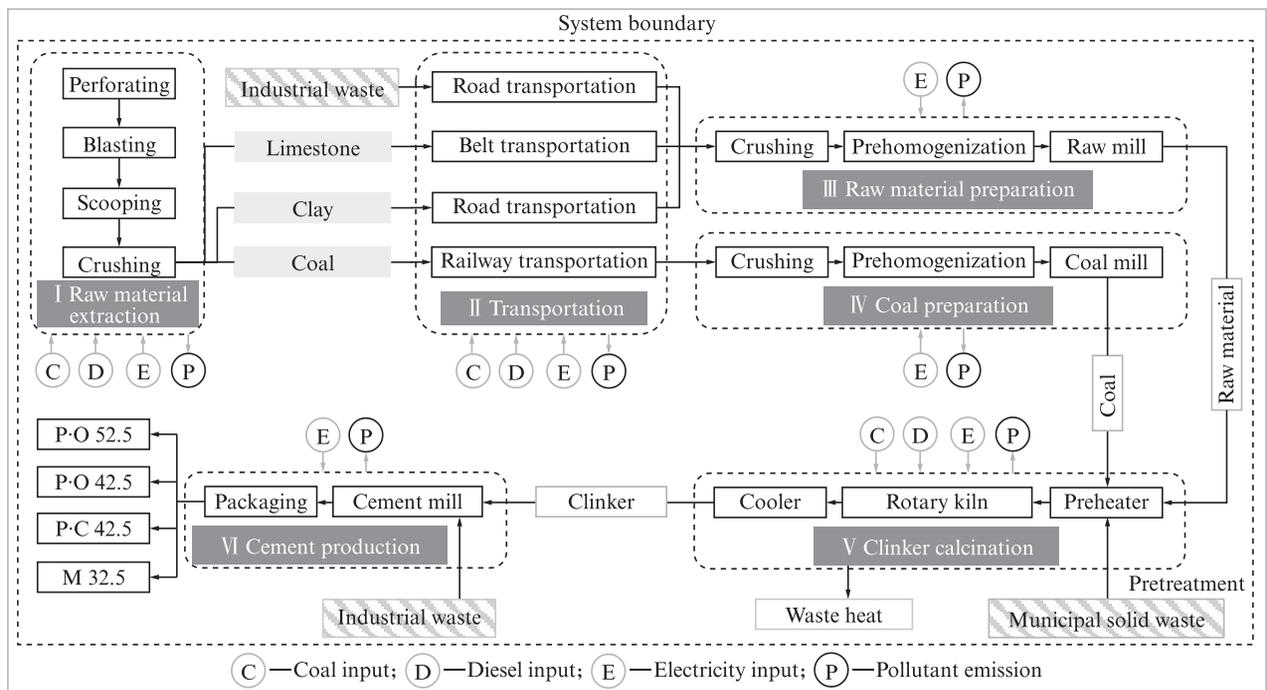


图1 水泥窑协同处置城市生活垃圾的系统边界

Fig. 1 System boundaries of municipal solid waste co-processing in cement kiln

### 1.2 生命周期清单分析

通过对水泥厂生产过程进行实地数据采集,缺

失数据参考国家/行业统计数据及相关文献资料<sup>[11-15]</sup>,构建水泥窑协同处置MSW的生命周期清单

数据.

### 1.2.1 原料及能源消耗清单

水泥生产过程中消耗的石灰石、低硅黏土等原料及煤炭、电力等能源数据均取自该水泥厂2022~2023年生产数据.MSW作为水泥窑协同处置废弃物,先经脱水预处理,预处理后含水率(质量分数)约40%,再与水泥生料一起投入回转窑内,作为生产熟料的替代性燃料和替代性原料.根据GB 50869—2013《生活垃圾卫生填埋处理技术规范》估算,水泥窑协同处置1 t MSW可节约填埋占地约0.167 m<sup>2</sup>.

除协同处置MSW(热值替代率15.67%),熟料煅烧阶段还使用少量废旧橡胶、市售固体燃料作为替代性燃料,燃料热值替代率达20.05%,以1 t熟料为单位,共节约标煤26.07 kg.此外,该水泥厂配有纯低温余热发电系统,单位熟料余热发电量约37.9 kW·h.

### 1.2.2 污染物排放及碳核算清单

结合GB 4915—2013《水泥工业大气污染物排放标准》,重点分析水泥生产过程中CO<sub>2</sub>、SO<sub>2</sub>、NO<sub>x</sub>、PM、Hg、氟化物和氨等污染物排放.其中,CO<sub>2</sub>排放

数据依据GB/T 32151.8—2015《温室气体排放核算与报告要求 第8部分:水泥生产企业》进行核算,过程涉及的参数取值见表1.其余排放数据均由水泥厂实时监测统计得到.

### 1.2.3 原料开采及能源生产清单

水泥所用石灰石原料来自该水泥厂自有石灰石矿山,以1 t为单位,开采各工序能耗见表2.爆破所用炸药为铵油炸药,碳排放因子为0.176 8<sup>[11]</sup>.

水泥生产消耗的能源主要为煤炭和电力,煤炭开采清单参考《中国环境统计年鉴2021》、《中国统计年鉴2022》及《2020煤炭行业发展年度报告》;电力生产清单参考《中国电力行业年度发展报告2022》,缺失数据引自相关电力生产生命周期清单<sup>[12-13]</sup>.

### 1.2.4 运输清单

石灰石在矿山破碎后采用皮带输送机运输至水泥厂,运输距离为3.5 km;煤炭采用铁路运输,根据百度地图运输距离约为2 330 km;其他原料均通过公路运输,运输距离采用2021年全国公路运输的平均运输距离177 km<sup>[1]</sup>.铁路及公路运输清单参考《2021铁道统计公报》及不同运输方式单位周转量能耗及污染物排放数据<sup>[14-15]</sup>.

表1 水泥生产碳核算涉及的参数取值

Table 1 Parameters involved in carbon accounting for cement production

| Accounting scope                    | Parameter value  |  |                        |
|-------------------------------------|--|--|------------------------|
| Fuel combustion emission            | Net calorific value/(GJ·t <sup>-1</sup> )  | Coal   | 21.742 <sup>a</sup>    |
|                                     |  | Diesel   | 42.652 <sup>a</sup>    |
|                                     | Carbon amount/(t·GJ <sup>-1</sup> )  | Coal   | 26.1×10 <sup>-3b</sup> |
|                                     |  | Diesel   | 20.2×10 <sup>-3b</sup> |
| Process emission                    | Carbon oxidation rate/%  | Coal   | 98 <sup>b</sup>        |
|                                     |  | Diesel   | 99 <sup>b</sup>        |
|                                     | CaO content(by mass) in clinker/%  |  | 65.558 <sup>a</sup>    |
|                                     | CaO content(by mass) that is not generated from carbonate decomposition in clinker/% |  | 0.745 <sup>a</sup>     |
| Emission from purchased electricity | MgO content(by mass) in clinker/%  |  | 0.630 <sup>a</sup>     |
|                                     |  | MgO content(by mass) that is not generated from carbonate decomposition in clinker/% |                        |
|                                     | Emission factor/(t·MW <sup>-1</sup> ·h <sup>-1</sup> )                               |  | 0.570 3 <sup>c</sup>   |

Note:<sup>a</sup> The data is the measured data of the cement plant; <sup>b</sup> The data is sourced from China National Standard GB/T 32151.8—2015; <sup>c</sup> The data is sourced from the notice issued by Ministry of Ecology and Environment of the People's Republic of China in 2023.

表2 单位石灰石开采清单

Table 2 Life cycle inventory of 1 t limestone mining

| Inventory item           | Perforating           | Blasting              | Scooping              | Crushing              | Belt transportation   | Other                 |
|--------------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|
| Explosive consumption/kg |                       | 1.87×10 <sup>-1</sup> |                       |                       |                       |                       |
| Diesel consumption/kg    | 3.90×10 <sup>-2</sup> |                       | 2.46×10 <sup>-1</sup> |                       |                       | 2.16×10 <sup>-2</sup> |
| Electricity/(kW·h)       |                       |                       | 2.51×10 <sup>-3</sup> | 8.25×10 <sup>-1</sup> | 1.25×10 <sup>-1</sup> |                       |

### 1.2.5 力学性能清单

该水泥厂生产的水泥主要包括 P·O 52.5 水泥、P·O 42.5 水泥、P·C 42.5 水泥及 M 32.5 水泥 4 种,相

应水泥熟料系数(水泥熟料占水泥的质量比)分别为 0.859、0.775、0.688 和 0.517,不同品种水泥 3、28 d 的抗压、抗折强度见表 3。

表 3 不同品种水泥 3、28 d 的抗压、抗折强度  
Table 3 Compressive strength and flexural strength of different cements at 3, 28 d

| Cement   | Mass ratio of clinker-to-cement | Compressive strength/MPa |      | Flexural strength/MPa |      |
|----------|---------------------------------|--------------------------|------|-----------------------|------|
|          |                                 | 3 d                      | 28 d | 3 d                   | 28 d |
| P·O 52.5 | 0.859                           | 35.8                     | 64.4 | 6.6                   | 8.9  |
| P·O 42.5 | 0.775                           | 28.4                     | 55.2 | 5.6                   | 8.6  |
| P·C 42.5 | 0.688                           | 23.9                     | 52.2 | 4.8                   | 8.8  |
| M 32.5   | 0.517                           | 16.3                     | 42.1 | 3.5                   | 8.0  |

### 1.2.6 不同品种水泥生命周期清单

将上述输入、输出数据汇总得到生产单位水泥的生命周期清单,如表 4 所示.需要指出的是,该水泥厂不同品种水泥的熟料生产过程均相同,仅水泥产品粉磨阶段混合材种类、掺量及粉磨电耗有所差异.此外,原料开采及运输、生料制备、煤粉制备和熟料煅烧阶段的清单数据以 1 t 熟料为单位,水泥制备阶段则是以 1 t 水泥为单位。

### 1.3 生命周期影响评价

生命周期影响评价可分为影响分类、特征化和归一化 3 个部分.根据 CML2001 评价模型,考虑水泥窑协同处置 MSW 特性,选取不可再生资源消耗(ADP)、温室效应(GWP)、人体健康损害(HTP)、环境酸化(AP)、光化学烟雾(POCP)、富营养化(EP)和土地占用(LU)7 种环境影响类型进行评价.其中,ADP 与 LU 的特征化因子均取自基于中国资源特点的本土化修正模型<sup>[16-17]</sup>,其他环境影响类型的特征化因子取自 CML2001 评价模型的特征化方法。

以综合环境负荷(integrated environmental load indicator,  $I_{IEL}$ )作为 LCA 最终评价指标,即采用世界范围内的归一化基准值<sup>[18]</sup>对特征化结果进行归一化处理.经加权计算后,得到综合环境负荷:

$$I_{IEL} = \sum \omega_i \frac{E_i}{E_{i,0}}, \quad \sum \omega_i = 1 \quad (1)$$

式中: $E_i$ 、 $E_{i,0}$  分别表示某一环境影响类型的环境负荷当量值(特征化结果)和归一化基准值; $\omega_i$  为权重系数。

水泥生产涉及的环境影响类型、归一化基准值及权重系数见表 5.其中,权重系数的取值基于笔者前期在中国水泥学术界和产业界进行的问卷调查,主要针对水泥领域科研院所和典型企业,通过资深专家打分及同行反馈,采用层次分析法

(AHP)确定了本土化且同行认可的 LCA 环境影响权重系数(见表 5 第 5 列)<sup>[19]</sup>,具有一定的专业性和权威性。

### 1.4 生命周期解释

生命周期解释以清单分析及影响评价的结果为基础,进行总体分析,将数据质量评估与蒙特卡洛模拟相结合,以评估水泥 LCA 结果的不确定度.其分析流程如图 2 所示.首先,根据数据质量谱系矩阵<sup>[20]</sup>从可信度、完整性、时间性、地域性和技术性 5 个方面对清单数据进行评估,确定数据质量指标;接着,采用修正的  $\beta$  分布<sup>[21]</sup>将每个清单数据的数据质量指标转换为概率密度函数(PDF);然后,利用 Crystal Ball 软件进行蒙特卡洛模拟,经多次随机抽样将清单数据的不确定性通过评价模型传播至最终结果,以量化由于清单数据不确定性的累积造成最终 LCA 结果的不确定度。

## 2 核算结果及分析讨论

### 2.1 熟料生产生命周期评价

#### 2.1.1 协同处置 MSW 生产熟料的环境负荷

经上述生命周期评价过程及核算,水泥窑协同处置 MSW 工艺生产单位熟料的综合环境负荷为  $5.67 \times 10^{-12}$ ,各生产阶段对环境影响类型的贡献见图 3.由于 LU 计算结果为负值,量级较小( $10^{-19}$ ),且仅熟料煅烧阶段涉及 LU,因此未在图中绘出。

由图 3 可知:在熟料生产各阶段中,熟料煅烧阶段造成的环境负荷最为严重,该阶段对温室效应(GWP)的贡献最大,占比为 95.59%;其次是运输阶段,该阶段在不可再生资源消耗(ADP)、环境酸化(AP)和光化学烟雾(POCP)中的贡献分别为 15.18%、13.00%、13.38%;煤粉制备阶段的环境负荷最小。

表4 单位水泥生产生命周期清单  
Table 4 Life cycle inventory of 1 t cement production

| Inventory item  | Raw material extraction | Transportation         | Raw material preparation | Coal preparation      | Clinker calcination    | Cement production     |                       |                       |                       |
|---|-------------------------|------------------------|--------------------------|-----------------------|------------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|
|   |                         |                        |                          |                       |                        | P·O 52.5              | P·O 42.5              | P·C 42.5              | M 32.5                |
| <i>m</i> (limestone)/kg   |                         |                        |                          |                       | $1.23 \times 10^3$     | $3.19 \times 10^1$    | $6.48 \times 10^1$    | $6.82 \times 10^1$    | $1.40 \times 10^2$    |
| <i>m</i> (clay)/kg  |                         |                        |                          |                       | $1.64 \times 10^2$     |                       |                       |                       |                       |
| <i>m</i> (red mud)/kg   |                         |                        |                          |                       | $5.36 \times 10^1$     |                       |                       |                       |                       |
| <i>m</i> (fly ash)/kg   |                         |                        |                          |                       | $8.12 \times 10^1$     |                       |                       | $6.79 \times 10^1$    | $9.46 \times 10^1$    |
| <i>m</i> (ferroalloy slag)/kg                                       |                         |                        |                          |                       |                        | $1.31 \times 10^1$    | $3.50 \times 10^{-1}$ | $3.10 \times 10^{-1}$ |                       |
| Resource consumption <i>m</i> (dust recycled from bypass system)/kg |                         |                        |                          |                       |                        |                       | $1.90 \times 10^0$    | $2.45 \times 10^0$    | $2.49 \times 10^0$    |
| <i>m</i> (coal-fired slag)/kg                                       |                         |                        |                          |                       |                        | $6.80 \times 10^1$    | $1.05 \times 10^2$    | $1.30 \times 10^2$    | $1.98 \times 10^2$    |
| <i>m</i> (desulfurization gypsum)/kg                                |                         |                        |                          |                       |                        | $4.11 \times 10^1$    | $4.02 \times 10^1$    | $4.31 \times 10^1$    | $4.76 \times 10^1$    |
| Land use/m <sup>2</sup>   |                         |                        |                          |                       | $-8.10 \times 10^{-3}$ |                       |                       |                       |                       |
| <i>m</i> (explosive)/kg   | $2.30 \times 10^{-1}$   |                        |                          |                       |                        |                       |                       |                       |                       |
| <i>m</i> (coal)/kg  | $5.76 \times 10^0$      | $1.77 \times 10^0$     |                          |                       | $1.33 \times 10^2$     |                       |                       |                       |                       |
| <i>m</i> (waste rubber)/kg  |                         |                        |                          |                       | $3.75 \times 10^0$     |                       |                       |                       |                       |
| <i>m</i> (marketed solid fuel)/kg                                   |                         |                        |                          |                       | $3.76 \times 10^0$     |                       |                       |                       |                       |
| <i>m</i> (diesel)/kg  | $3.77 \times 10^{-1}$   | $1.83 \times 10^1$     |                          |                       | $1.37 \times 10^{-2}$  |                       |                       |                       |                       |
| Electricity/(kW·h)  | $1.02 \times 10^0$      | $1.54 \times 10^{-1}$  | $1.89 \times 10^1$       | $3.73 \times 10^0$    | $2.11 \times 10^1$     | $3.24 \times 10^1$    | $2.65 \times 10^1$    | $2.07 \times 10^1$    | $2.59 \times 10^1$    |
| Co-processing waste <i>m</i> (municipal solid waste)/kg             |                         |                        |                          |                       | $4.85 \times 10^1$     |                       |                       |                       |                       |
| <i>m</i> (CO <sub>2</sub> )/kg                                      | $1.29 \times 10^1$      | $1.01 \times 10^1$     | $1.08 \times 10^1$       | $2.13 \times 10^0$    | $8.05 \times 10^2$     | $1.88 \times 10^1$    | $1.54 \times 10^1$    | $1.20 \times 10^1$    | $1.50 \times 10^1$    |
| <i>m</i> (SO <sub>2</sub> )/kg                                      | $7.83 \times 10^{-4}$   | $6.04 \times 10^{-3}$  | $1.91 \times 10^{-3}$    | $3.77 \times 10^{-4}$ | $1.31 \times 10^{-2}$  | $3.27 \times 10^{-3}$ | $2.68 \times 10^{-3}$ | $2.09 \times 10^{-3}$ | $2.62 \times 10^{-3}$ |
| <i>m</i> (NO <sub>x</sub> )/kg                                      | $9.58 \times 10^{-4}$   | $6.06 \times 10^{-2}$  | $2.87 \times 10^{-3}$    | $5.67 \times 10^{-4}$ | $4.39 \times 10^{-1}$  | $4.92 \times 10^{-3}$ | $4.03 \times 10^{-3}$ | $3.15 \times 10^{-3}$ | $3.94 \times 10^{-3}$ |
| <i>m</i> (PM)/kg  | $2.45 \times 10^{-2}$   | $3.50 \times 10^{-3}$  | $5.05 \times 10^{-3}$    | $1.56 \times 10^{-3}$ | $2.66 \times 10^{-2}$  | $3.40 \times 10^{-3}$ | $3.27 \times 10^{-3}$ | $3.15 \times 10^{-3}$ | $3.26 \times 10^{-3}$ |
| <i>m</i> (Hg)/kg  | $2.40 \times 10^{-8}$   | $3.62 \times 10^{-9}$  | $4.44 \times 10^{-7}$    | $8.77 \times 10^{-8}$ | $6.73 \times 10^{-7}$  | $7.61 \times 10^{-7}$ | $6.23 \times 10^{-7}$ | $4.86 \times 10^{-7}$ | $6.09 \times 10^{-7}$ |
| <i>m</i> (fluoride)/kg  | $1.88 \times 10^{-9}$   | $2.83 \times 10^{-10}$ | $3.48 \times 10^{-8}$    | $6.86 \times 10^{-9}$ | $2.51 \times 10^{-4}$  | $5.96 \times 10^{-8}$ | $4.88 \times 10^{-8}$ | $3.81 \times 10^{-8}$ | $4.77 \times 10^{-8}$ |
| <i>m</i> (ammonia)/kg   | $1.90 \times 10^{-7}$   | $2.86 \times 10^{-8}$  | $3.52 \times 10^{-6}$    | $6.94 \times 10^{-7}$ | $2.70 \times 10^{-3}$  | $6.03 \times 10^{-6}$ | $4.93 \times 10^{-6}$ | $3.85 \times 10^{-6}$ | $4.82 \times 10^{-6}$ |

表 5 水泥生产涉及的环境影响类型、归一化基准值及权重系数

Table 5 Environmental impact categories, reference values and weight coefficients involved in cement production

| Environmental impact category | Inventory item  | Equivalent unit                      | $E_{i,0}$             | $w_i$   |
|-------------------------------|---|--------------------------------------|-----------------------|---------|
| ADP                           | Limestone, clay, coal, diesel                                 | kg Sb eq.                            | $2.14 \times 10^{10}$ | 0.300 5 |
| GWP                           | CO <sub>2</sub>   | kg CO <sub>2</sub> eq.               | $4.18 \times 10^{13}$ | 0.266 3 |
| HTP                           | SO <sub>2</sub> , NO <sub>x</sub> , PM, Hg, fluoride, ammonia | kg 1,4-dichlorobenzene eq.           | $2.58 \times 10^{12}$ | 0.250 2 |
| AP                            | SO <sub>2</sub> , NO <sub>x</sub> , fluoride, ammonia         | kg SO <sub>2</sub> eq.               | $2.39 \times 10^{11}$ | 0.070 4 |
| POCP                          | SO <sub>2</sub> , NO <sub>x</sub>                             | kg ethylene eq.                      | $3.68 \times 10^{10}$ | 0.056 5 |
| EP                            | NO <sub>x</sub> , ammonia                                     | kg PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup> eq. | $1.58 \times 10^{11}$ | 0.032 6 |
| LU                            | Area  | Net primary productivity             | $1.16 \times 10^{15}$ | 0.023 5 |

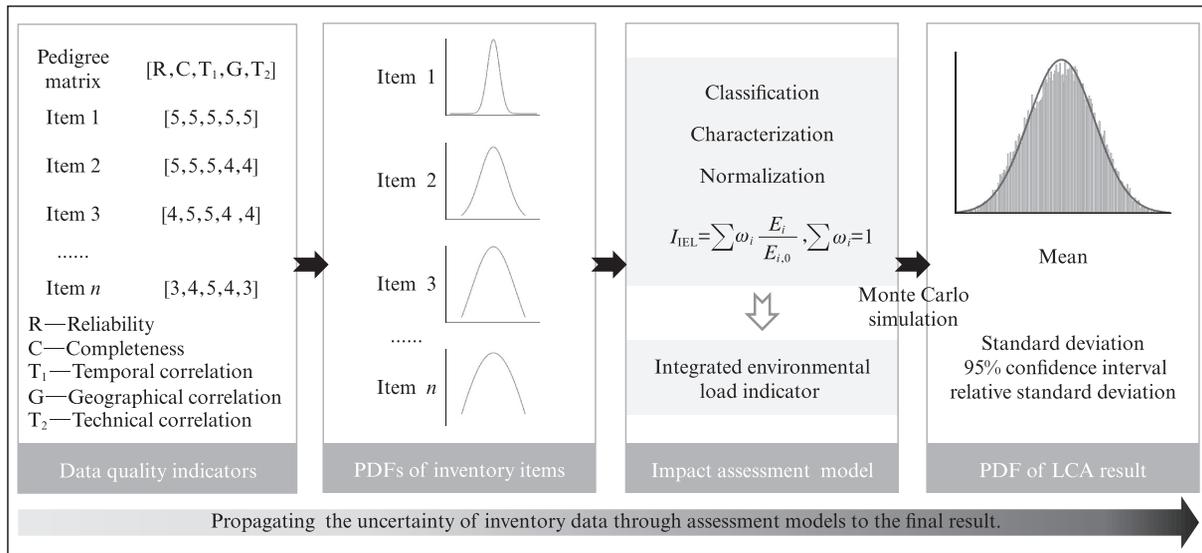


图 2 不确定度分析流程

Fig. 2 Process framework of the uncertainty analysis

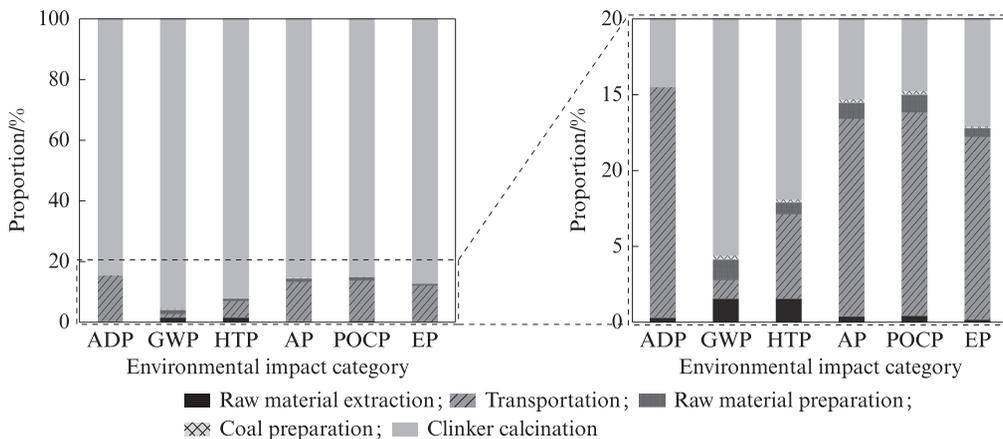


图 3 熟料各生产阶段对环境的影响类型的贡献

Fig. 3 Contribution of the clinker production stages on environmental impact categories

2.1.2 协同处置MSW的环境负荷降幅

计算常规工艺生产熟料<sup>[22-25]</sup>的综合环境负荷,进一步探究水泥窑协同处置工艺较常规工艺环境负荷的降幅,结果见图4.

由图4(a)可以看出,相较常规工艺,水泥窑协同处置工艺中MSW作为熟料生产的替代性原料和替

代性燃料,节约了煤炭等不可再生资源的消耗,并在一定程度上减少了CO<sub>2</sub>排放,使ADP和GWP的环境负荷分别下降了12.04%、2.61%.与常规熟料生产工艺相比,水泥窑协同处置MSW各环境影响类型下的环境负荷均有不同程度的降低,综合环境负荷下降7.82%(见图4(b)).

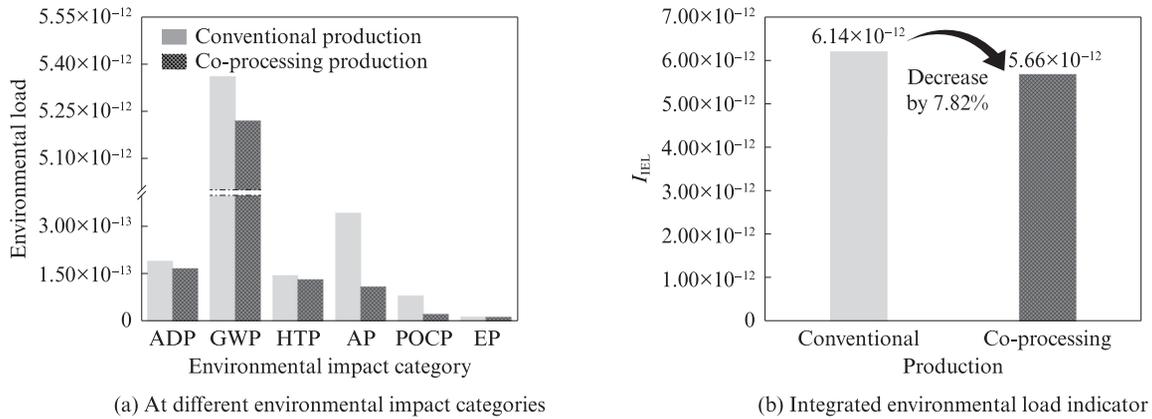


图4 常规工艺与协同处置工艺生产熟料环境负荷的对比

Fig. 4 Comparison of environmental load of clinker by conventional and co-processing production,

2.2 不同品种水泥生产生命周期评价

2.2.1 不同品种水泥的环境负荷

该厂利用水泥窑协同处置MSW生产的熟料,进

一步用于生产P·O 52.5、P·O 42.5、P·C 42.5和M 32.5水泥,4种水泥各生产阶段、各环境影响类型下的环境负荷及综合环境负荷见图5。

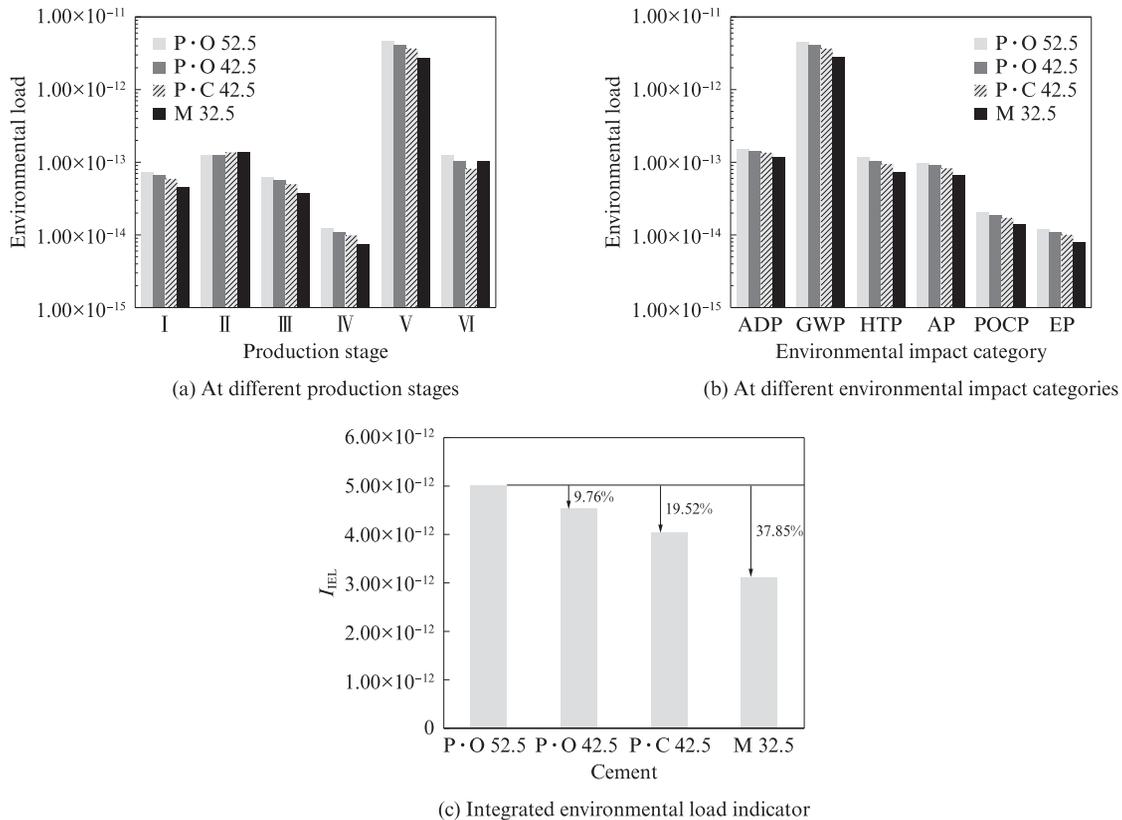


图5 不同品种水泥的环境负荷

Fig. 5 Environmental load of different cements

观察4种水泥各生产阶段环境负荷的变化,由图5(a)可以看出:原料开采(I)、生料制备(III)、煤粉制备(IV)和熟料煅烧(V)阶段的环境负荷均随着水泥熟料系数的降低而减小,但运输(II)及水泥制备(VI)阶段环境负荷的变化与该规律并不相符,这可能与水泥混合材的种类及掺量有关;M 32.5水泥混合材掺量最大且种类较多,不同混合材均采用环

境负荷较大的公路运输<sup>[26]</sup>,致使M 32.5水泥运输阶段的环境负荷最大;而P·C 42.5水泥在水泥制备阶段环境负荷最小,这可能与其中铁合金炉渣、燃煤炉渣等易磨性较差的工业废弃物掺入量较低有关。

从图5(b)可以看出,除土地占用外,4种水泥中P·O 52.5水泥对所有环境影响类型的环境负荷均较大,M 32.5水泥则较小,这表明水泥熟料系数是环境

负荷的重要影响因素.由式(1)计算得到各水泥生产的综合环境负荷,见图5(c),相较于P·O 52.5水泥,P·O 42.5、P·C 42.5和M 32.5水泥的综合环境负荷分别降低了9.76%、19.52%及37.85%.

综合考虑水泥窑协同处置MSW生产熟料和水泥熟料系数降低带来的环境效益,采用水泥窑协同处置工艺生产熟料系数为0.517的M 32.5水泥与采用常规工艺生产的熟料系数为0.859的P·O 52.5水泥相比,其综合环境负荷降幅达42.11%.基于相同强度等级进行比较,采用常规工艺生产的熟料系数为0.775的P·O 42.5水泥与采用水泥窑协同处置工艺生产的熟料系数为0.688的P·C 42.5水泥相比,其综合环境负荷降幅为16.87%.

### 2.2.2 环境负荷与性能的耦合评价

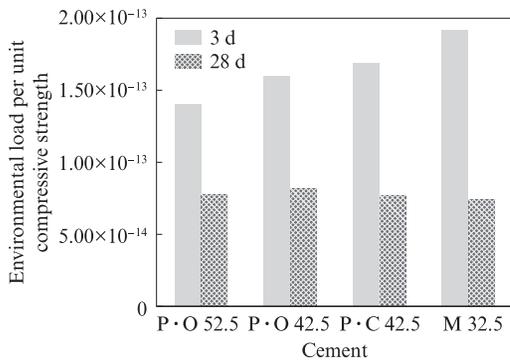
将环境负荷与水泥力学性能进行耦合评价,采用单位强度的环境负荷来综合评价不同品种水泥生产的环境影响,如图6所示.

由图6可知:P·O 52.5水泥3 d单位抗压、抗折强

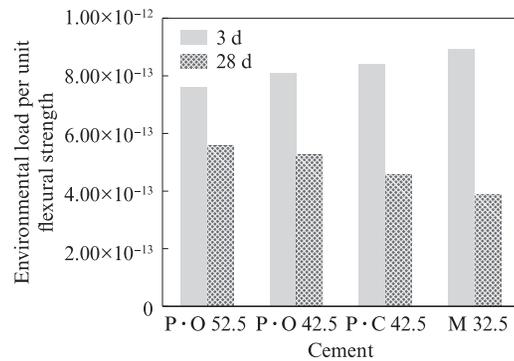
度的环境负荷最小,而M 32.5水泥3 d单位抗压、抗折强度的环境负荷最大,且3 d单位抗压、抗折强度的环境负荷均随着水泥熟料系数的降低而增大;不同品种水泥28 d单位抗压强度的环境负荷相差不大,而28 d单位抗折强度的环境负荷则随着熟料系数的降低呈下降趋势.这可能是因为粉煤灰、燃煤炉渣等混合材具有一定火山灰活性,水化速率慢,水泥早期强度随混合材掺量增加而降低,随着水化反应的进行,后期强度增长较快<sup>[27-28]</sup>.P·O 52.5水泥综合环境负荷最大,但由于其抗压、抗折强度较高,因此其单位强度的环境负荷相对较小.

### 2.3 数据质量评估

以P·O 52.5水泥为例进行数据质量评估,其他品种水泥同理.将蒙特卡洛模拟随机抽样次数从1 000次逐渐增加到30 000次,观察模拟结果标准差的变化(图7),以确定模拟结果趋于稳定所需随机抽样次数.



(a) Environmental load per unit compressive strength



(b) Environmental load per unit flexural strength

图6 不同品种水泥单位强度的环境负荷

Fig. 6 Environmental load per unit strength of different cements

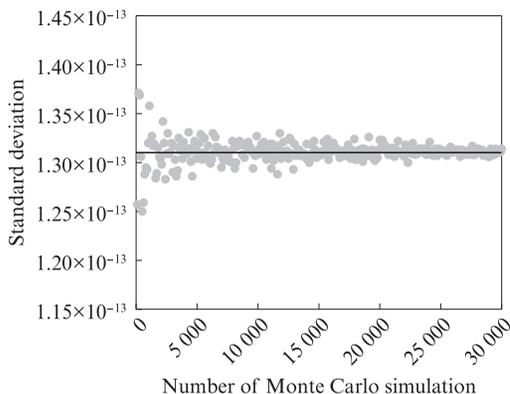


图7 30 000次蒙特卡洛模拟结果标准差的变化

Fig. 7 Changes in standard deviation of results over 30 000 Monte Carlo simulations

由图7可以看出,蒙特卡洛模拟结果的标准差在大约24 000次随机抽样后无显著变化,研究选取25 000次作为最终蒙特卡洛模拟的随机抽样次数.

经25 000次蒙特卡洛模拟,各生产阶段环境负荷及综合环境负荷模拟结果的不确定度(均值、标准差、95%置信区间及相对标准差)见表6,水泥综合环境负荷的概率密度分布见图8.

由表6和图8可知,水泥生产综合环境负荷的概率密度分布较为集中,各生产阶段环境负荷及综合环境负荷模拟结果的相对标准差均低于0.07,不确定度较小.其中,原煤开采及铁路、公路运输等背景数据多从近3年国家/行业统计数据获取,可信度及时间相关性较高,在一定程度上降低了结果的不确定度,但仍有部分排放数据存在一定偏差或缺失,因此原料开采和运输阶段是水泥各生产阶段中数据不确定度较高的阶段.熟料煅烧阶段清单数据均来源于水泥厂实地调研,结果不确定度最低.

随着中国垃圾分类的普遍推行,水泥窑协同处置

表6 水泥各生产阶段环境负荷及综合环境负荷的不确定度

Table 6 Uncertainty of environmental load and intergrated environmental load indicator of Portland cement

| Production stage         | Mean value             | Standard deviation     | 95% confidence interval                        | Relative standard deviation |
|--------------------------|------------------------|------------------------|--|-----------------------------|
| Raw material extraction  | $7.35 \times 10^{-14}$ | $4.67 \times 10^{-15}$ | $[6.07 \times 10^{-14}, 8.61 \times 10^{-14}]$ | 0.063 6                     |
| Transportation           | $1.25 \times 10^{-13}$ | $7.02 \times 10^{-15}$ | $[1.02 \times 10^{-13}, 1.48 \times 10^{-13}]$ | 0.056 0                     |
| Raw material preparation | $6.25 \times 10^{-14}$ | $3.05 \times 10^{-15}$ | $[5.38 \times 10^{-14}, 7.08 \times 10^{-14}]$ | 0.048 8                     |
| Coal preparation         | $1.23 \times 10^{-14}$ | $5.96 \times 10^{-16}$ | $[1.07 \times 10^{-14}, 1.40 \times 10^{-14}]$ | 0.048 4                     |
| Clinker calcination      | $4.62 \times 10^{-12}$ | $1.30 \times 10^{-13}$ | $[4.23 \times 10^{-12}, 5.01 \times 10^{-12}]$ | 0.028 2                     |
| Cement production        | $1.25 \times 10^{-13}$ | $5.91 \times 10^{-15}$ | $[1.08 \times 10^{-13}, 1.42 \times 10^{-13}]$ | 0.047 2                     |
| $I_{IEL}$                | $5.02 \times 10^{-12}$ | $1.31 \times 10^{-13}$ | $[4.62 \times 10^{-12}, 5.40 \times 10^{-12}]$ | 0.026 0                     |

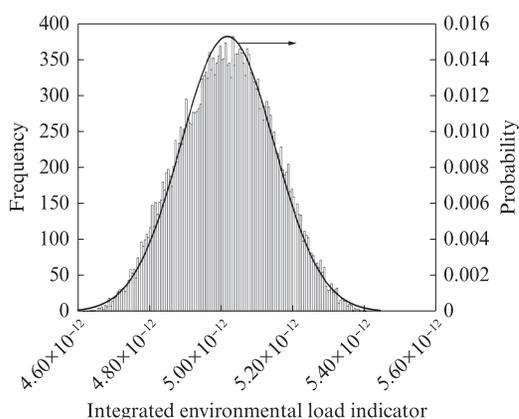


图8 水泥综合环境负荷的概率密度分布

Fig. 8 Probability density distribution of integrated environmental load indicator of Portland cement

MSW技术也面临着优化革新。MSW分类后,含水率较高的湿垃圾及成分复杂的有害垃圾可经单独预处理后进入水泥窑,以提高MSW的热值替代率、稳定垃圾成分、减少有害组分对水泥熟料性能的影响。此外,对不同特性的垃圾进行单独预处理,还可减少目前所有垃圾统一预处理造成的资源浪费和环境污染。

### 3 结论

(1)与常规熟料生产工艺相比,水泥窑协同处置工艺不可再生资源消耗和温室效应的环境负荷分别下降了12.04%、2.61%,且各环境影响类型下的环境负荷均有一定程度的降低,每吨熟料综合环境负荷降幅为7.82%。

(2)4种水泥中,P·O 52.5水泥的综合环境负荷最大,但其单位强度的环境负荷相对较小;水泥熟料系数是影响不同品种水泥环境负荷的重要因素,熟料系数由0.859降低到0.517,水泥综合环境负荷可降低9.76%~37.85%。

(3)综合考虑水泥窑协同处置MSW和熟料系数降低带来的环境效益,对于相同强度等级的水泥,采用常规工艺生产熟料系数为0.775的P·O 42.5水泥与采用水泥窑协同处置工艺生产熟料系数为

0.688的P·C 42.5水泥相比,其综合环境负荷降幅为16.87%。

(4)经25 000次蒙特卡洛模拟,水泥综合环境负荷模拟结果的相对标准差低于0.07,不确定度较小;在各生产阶段中,熟料煅烧阶段数据的不确定度最低,而原料开采和运输阶段的不确定度较高。

### 参考文献:

- [1] 国家统计局. 中国统计年鉴-2022[J]. 北京: 中国统计出版社, 2022. National Bureau of Statistics. China statistical yearbook-2022 [J]. Beijing: China Statistics Press, 2022. (in Chinese)
- [2] 高琦,肖建庄,沈剑羽. 园林垃圾对工程弃土烧结砖性能的影响[J]. 建筑材料学报, 2022, 25(11): 1195-1202. GAO Qi, XIAO Jianzhuang, SHEN Jianyu. Effects of garden waste on the properties of sintered bricks prepared with construction spoil[J]. Journal of Building Materials, 2022, 25(11): 1195-1202. (in Chinese)
- [3] FAN C C, WANG B M, AI H M, et al. A comparative study on solidification/stabilization characteristics of coal fly ash-based geopolymer and Portland cement on heavy metals in MSWI fly ash [J]. Journal of Cleaner Production, 2021, 319: 128790.
- [4] LI X Y, ZHANG H, LIU M J, et al. Emission characteristics of dioxin during solid waste co-processing in the Chinese cement industry[J]. Journal of Hazardous Materials, 2023, 446: 130680.
- [5] 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. GUO Xiaolu, LI Yinxue, YUAN Shuting. Life cycle assessment of cement and its research progress in low environmental load[J]. Journal of Building Materials, 2023, 26(6): 660-669, 677. (in Chinese)
- [6] 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 principles and approaches for development of sustainable concrete[J]. Journal of Building Materials, 2016, 19(6): 957-963. (in Chinese)
- [7] KOSAJAN V, WEN Z G, FEI F, et al. The feasibility analysis of cement kiln as an MSW treatment infrastructure: From a life cycle environmental impact perspective[J]. Journal of Cleaner Production, 2020, 267: 603-614.
- [8] HUANG T, TANG Y T, SUN Y, et al. Life cycle

- environmental and economic comparison of thermal utilization of refuse derived fuel manufactured from landfilled waste or fresh waste[J]. *Journal of Environmental Management*, 2022, 304: 114156.
- [9] 王晓丽,林忠财.固废基低钙固碳水泥熟料组成设计及烧成过程[J]. *建筑材料学报*, 2022, 25(11):1115-1120.  
WANG Xiaoli, LIN Zhongcai. Composition design and sintering process of solid waste-based low-calcium carbon-fixing cement clinker [J]. *Journal of Building Materials*, 2022, 25 (11) : 1115-1120. (in Chinese)
- [10] 郭晓璐,施惠生. MSWIFA制CSA水泥基材料的抗压强度和耐久性[J]. *建筑材料学报*, 2014, 17(2):201-205, 255.  
GUO Xiaolu, SHI Huisheng. Compressive strength and durability of calcium sulphoaluminate(CSA) cement-based materials from municipal solid waste incineration fly ash(MSWIFA)[J]. *Journal of Building Materials*, 2014, 17(2) :201-205, 255. (in Chinese)
- [11] 李叶青. 水泥及混凝土绿色低碳制造技术[M]. 北京:中国建材工业出版社, 2022.  
LI Yeqing. Green low carbon manufacturing technology of cement and concrete[M]. Beijing: China Building Materials Press, 2022. (in Chinese)
- [12] 聂鹏. 燃煤电厂大气汞污染环境及其排放标准实施效果数值模拟研究[D]. 北京:中国环境科学研究院, 2014.  
NIE Peng. The study on emission standards for coal fired power plants of mercury and simulation of their environmental impact [D]. Beijing: Chinese Research Academy of Environmental Sciences, 2014. (in Chinese)
- [13] 刘夏璐,王洪涛,陈建,等. 中国生命周期参考数据库的建立方法与基础模型[J]. *环境科学学报*, 2010, 30(10):2136-2144.  
LIU Xialu, WANG Hongtao, CHEN Jian, et al. Method and basic model for development of Chinese reference life cycle database [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2010, 30 (10) : 2136-2144. (in Chinese)
- [14] 田佩宁,毛保华,童瑞咏,等. 我国交通运输行业及不同运输方式的碳排放水平和强度分析[J]. *气候变化研究进展*, 2023, 19(3): 347-356.  
TIAN Peining, MAO Baohua, TONG Ruiyong, et al. Analysis of carbon emission level and intensity of China's transportation industry and different transportation modes [J]. *Climate Change Research*, 2023, 19(3):347-356. (in Chinese)
- [15] 王陶,张志智,孙潇磊. 不同柴油生产路径碳排放的分析与比较[J]. *当代石油石化*, 2020, 28(12):28-31, 54.  
WANG Tao, ZHANG Zhizhi, SUN Xiaolei. Analysis and comparison of carbon emissions from different diesel production routes [J]. *Petroleum & Petrochemical Today*, 2020, 28(12) : 28-31, 54. (in Chinese)
- [16] 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)
- [17] 刘某承,李文华,谢高地. 基于净初级生产力的中国生态足迹产量因子测算[J]. *生态学杂志*, 2010, 29(3):592-597.  
LIU Moucheng, LI Wenhua, XIE Gaodi. Estimation of China ecological footprint production coefficient based on net primary productivity [J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2010, 29 (3) : 592-597. (in Chinese)
- [18] 方海峰,陈轶嵩,许海波. 增程式电动轿车全生命周期节能减排效果分析[J]. *汽车实用技术*, 2019, 299(20):22-25.  
FANG Haifeng, CHEN Yisong, XU Haibo. Life cycle assessment of energy conservation and emissions reduction extended-range electric vehicle [J]. *Automobile Applied Technology*, 2019, 299(20):22-25. (in Chinese)
- [19] GUO X L, LI Y X, SHI H S, et al. Carbon reduction in cement industry - An indigenized questionnaire on environmental impacts and key parameters of life cycle assessment(LCA) in China [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2023, 426:139022.
- [20] BICALHO T, SAUER I, RAMBAUD A, et al. LCA data quality: A management science perspective [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2017, 156:888-898.
- [21] YU B, WANG S Y, GU X Y. Estimation and uncertainty analysis of energy consumption and CO<sub>2</sub> emission of asphalt pavement maintenance [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2018, 189:326-333.
- [22] 邵亦白,刘宇,郑焱,等. 利废水泥熟料产品系统的生命周期清单分析方法及应用[J]. *中国水泥*, 2022, 246(11):59-62.  
SHAO Yibai, LIU Yu, ZHENG Yan, et al. Life cycle inventory analysis method and application of waste clinker product system [J]. *China Cement*, 2022, 246(11):59-62. (in Chinese)
- [23] 侯星宇,张芸,戚昱,等. 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.  
HOU Xingyu, ZHANG Yun, QI Yu, et al. Life cycle assessment of co-processing industrial waste in a cement kiln [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2015, 35(12):4112-4119. (in Chinese)
- [24] TAO M, LU D M, SHI Y, et al. Utilization and life cycle assessment of low activity solid waste as cementitious materials: A case study of titanium slag and granulated blast furnace slag [J]. *Science of the Total Environment*, 2022, 849:157797.
- [25] 刘祥凯. 水泥行业主要气态污染物(SO<sub>2</sub>、NO<sub>x</sub>和氟化物)排放特征研究[J]. *环境与可持续发展*, 2016, 41(4):239-240.  
LIU Xiangkai. Research on emission characteristics of primary gaseous pollutants (sulfur dioxide, nitric oxide and fluoride) from the cement industry [J]. *Environment and Sustainable Development*, 2016, 41(4):239-240. (in Chinese)
- [26] STAFFORD F N, RAUPP-PEREIRA F, LABRINCHA J A, et al. Life cycle assessment of the production of cement: A Brazilian case study [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2016, 137:1293-1299.
- [27] ZHANG W Y, SHI F F, ZHAO L Y, et al. Effect of biomineralization on the early mechanical properties and microstructure of fly-ash cement-based materials [J]. *Construction and Building Materials*, 2022, 359:129422.
- [28] SUPIT S W M, SHAIKH F U A, SARKER P K. Effect of ultrafine fly ash on mechanical properties of high volume fly ash mortar [J]. *Construction and Building Materials*, 2014, 51: 278-286.