

基于SimaPro的水泥产品生命周期评价及“减碳”建议

杨瑞锦

(兰州财经大学,甘肃 兰州 730020)

摘要:利用生命周期评价软件SimaPro(Version9.3.0.2),对某水泥公司水泥的生产过程进行生命周期评价,探究不同原材料和能源消耗及不同阶段对环境造成的影响,有效识别出水泥生产过程中碳排放较为集中的阶段。研究表明:水泥生产过程中的碳排放集中在生料生产环节和熟料烧成环节,并提出了3种促进水泥生产过程的减碳方法和措施。

关键词:双碳;水泥产品;SimaPro;环境影响;生命周期评价

中图分类号:TU506 **文献标识码:**A **文章编号:**1007-6344(2023)09-0004-04

0 引言

在“双碳”目标的实现过程中,水泥作为工业领域的第二大碳排放来源,其生产过程面临着严峻的减排压力。水泥被认为是全世界用量最大的材料^[1],全球水泥工业的碳排放量占人类活动碳排放总量的7%~9%,占能耗的12%左右,特别是使用化石燃料以及在熟料生产中对石灰石的脱碳导致了二氧化碳的高排放^[2]。虽然近年来我国在水泥领域的控碳工作已取得一定成效,但发展进程缓慢。

本文将从水泥工业的生命周期视角出发,利用生命周期评价软件SimaPro(Version9.3.0.2),以广西省某水泥有限公司2021年水泥生产为基础,对其进行生命周期评价,以探究其对环境造成的影响。同时,生命周期评价可以定量分析不同环境影响类型之间和不同生命周期阶段之间的环境问题,有效识别出生产过程中碳排放较为集中的阶段,从而为水泥工业降低碳排放提供合理的建议。

1 生命周期评价方法

1.1 生命周期评价的定义

根据国际标准化组织(ISO)的定义,生命周期评价(LCA)是一种用于评估产品、技术或服务在生命周期中潜在的环境影响和资源利用情况的工具。生命周期是从原材料的获取,到产品的生产和使用,最终到废弃物管理的全过程。LCA是一种综合性评估,评估内容包括对自然环境、人类健康和资源利用等各方面的影响^[3]。

本文使用的是ISO14040定义的基础LCA方法,基本框架分为4个部分:目标与范围的确定,清单分析,影响评价和结果解释。生命周期评价流程如图1所示。

1.2 生命周期评价工具

现有的商业化LCA软件有几十种,目前国外市场上公开出售的LCA软件大多数是欧洲版,以SimaPro(荷兰)、TEAM(法国)、Gabi(德国)等软件为主^[4]。

我国于2004年建立了较成体系的数据库Sinaceter,该数据库根据我国实际情况及ISO4040技术框架建立了50000条关于水泥、涂料、钢铁等建材数据记录^[5]。王洪涛等在2009年开始研发LCA软件,现已建立中国生命周期参考数据库(CLCD)^[6],ebalance环境评价软件以及国际首个一站式集成SaaS服务平台We-bLCA。目前国际上应用最广泛的LCA研究工具是SimaPro和GaBi软件,国产LCA软件中常用的是eBalance。这三款软件均基于ISO14040的LCA分析框架和流程建立计算模型。

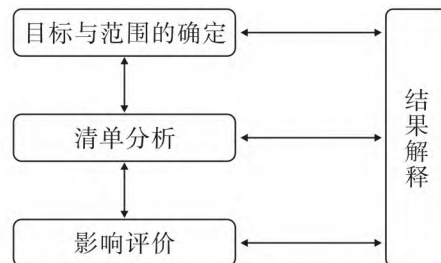


图1 生命周期评价流程图

2 水泥产品的生命周期环境影响评价

2.1 目标与范围的确定

2.1.1 研究目标

本文的研究内容主要考虑广西省某水泥有限公司2021年水泥生产生命周期系统对环境造成的影响。研究包括生料生产环节、熟料生产环节、水泥生产、移动源及余热发电。

2.1.2 研究范围

(1)功能单元。本研究设定的功能单位是1t熟料含量为70%的通用水泥。

(2)系统边界。由于水泥产品的使用和维护阶段几乎不对环境产生影响,且循环利用和废弃物处理具有复杂性和不确定性,数据有限,所以本研究也不做考虑。因此,本研究系统边界的范围界定为:原材料的开采和加工、能源的生产、水泥的制造,以及中间涉及到

的运输过程。水泥生命周期流程图如图2所示。

2.2 清单分析

水泥生产消耗的主要原料有石灰石、黏土或砂岩、铁矿石或硫酸渣、石膏,以及一些工业废弃物,如矿渣和粉煤灰。实际评价过程中,由于数据库中不存在某些原料,因此选用相近的物质进行替代。其中,骨料用

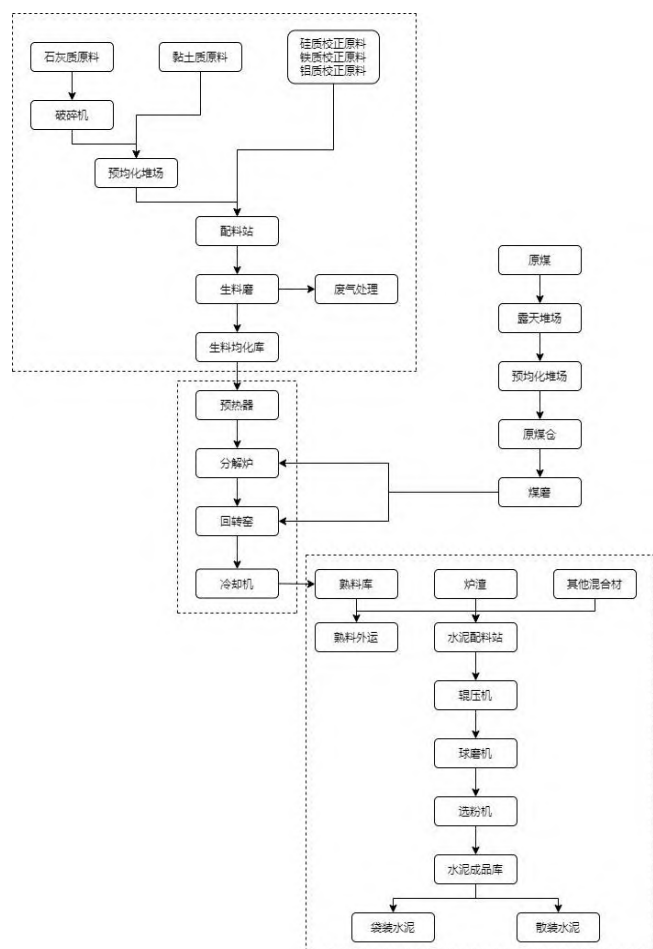


图2 水泥产品的研究范围和系统边界

2.3 影响评价(LCIA)

ISO、SEATC和EPA都倾向于把生命周期影响评价视为一个“三步走”的模型,即分类、特征化和标准化。国际标准ISO14042《生命周期影响评价》中认为,特征化是必须要求的,而标准化是根据研究目的可选择的内容。由于标准化具有很强的主观性,在水泥生命周期评价过程中,为了保证评价结果的客观性,忽略掉标准化步骤。

(1)分类是将清单中的输入和输出数据分成不同的环境影响类型。影响类型是根据生命周期评价的范围来确定的。二氧化碳的排放对环境的影响有三大类,即人类健康、生态系统健康和资源消耗。

(2)特征化是根据环境影响类型,对数据进行分类和量化分析处理,并将得到的分析结果转化为相应的环境影响类型的过程。

Sand代替,低硅砂岩用Silica sand代替,铁尾泥用Iron ore、crude ore代替,铜渣用Copper代替,高硅砂岩用Silica sand代替,采矿废石用Gravel代替,有色金属灰渣用Granulated blast furnace slag代替,铁合金炉渣用Basic oxygen furnace slag代替。每吨水泥产品的生命周期清单如表1所示。

表1 水泥产品生命周期清单

环节	物质输入	单位	数值	物质输出	单位	数值
生料生产环节	石灰石	t	3771812	生料	t	3294104.7
	骨料	t	673799			
	低硅砂岩	t	259109			
	铁尾泥	t	90260			
	铜渣	t	52176			
	高硅砂岩	t	277949			
	采矿废石	t	244216			
	有色金属灰渣	t	50656			
	铁合金炉渣	t	10412			
	页岩	t	37738			
	电力	kWh	4554256			
熟料生产环节(熟料烧成)	烟煤	t	311668	熟料		2079832.3
	柴油	t	57.5	CO ₂ (生料中非燃料煅烧的排放量)		12078.38
	生料	t	3294105	CO ₂ (原料分解排放)	t	1107563.3
	电	kWh	109417340	CO ₂ (烟煤)		644127.22
				CO ₂ (柴油)		179.83128
水泥生产	熟料	t	2079832.3	水泥	t	1634776.4
	脱硫石膏	t	58545			
	磷石膏	t	26922			
	电力	kWh	41892398			
移动源	柴油	t	57.5	CO ₂	t	3275.6752
余热发电	余热	/	/	电	MWh	68046.69

2.3.1 分类

目前,国际上没有统一的环境影响类型分类方法。SETAC于1999年提出的Eco-indicator99分类评估方案至今仍被大部分LCA研究所采用。Eco-indicator99的单位是Pt,它是一个无量纲的基准量,由当地居民总人口去除以当地总的环境负荷再乘以1000得到^[7]。该方案包含人类健康(human health)、生态系统健康(ecosystems)和资源消耗(resources)3大类。

为了更准确地评估水泥生命周期的污染物排放对环境的影响,本文选取ReCiPe 2016环境影响评估方法,并用该方法分析了全生命周期排放的污染物对于环境的18种影响。该方法主要包括两种:Midpoint方法和Endpoint方法,两种方法是互补的关系,Endpoint方法与环境流关联性较好,但Midpoint方法的确定性

更好^[8]。ReCiPe 2016 Midpoint 评价方法是按照 IPCC 第五次报告的全球变暖潜值计算方法,折算 CO₂当量。18种影响分别为:平流层臭氧消耗、电离辐射、臭氧形成(人类健康)、细颗粒物的形成、臭氧形成(陆地生态系统)、土地酸化、淡水富营养化、海洋酸化、土地生态毒性、淡水生态毒性、海洋生态毒性、人类致癌毒性、人类非致癌毒性、矿产资源耗竭、耗水量、土地使用、全球变暖和化石资源耗竭。

2.3.2 特征化

特征化的结果是反映环境影响绝对量大小的参数。假设每一种影响类型的总值为100%,通过每一个生命周期阶段在每个影响类型中所占的比例可知每个阶段对每种影响类型的贡献率的相对大小。利用生命周期评价(LCA)软件 SimaPro 计算得出 1t 水泥产品的生命周期特征化结果, Midpoint 方法下的特征化结果如表2所示,各阶段特征化结果如表3所示。

表2 Midpoint 方法下 1t 水泥产品生命周期特征化结果(单位:%)

分类	碳排放	石灰岩	沙子	硅砂	铁矿石	富铜材料	硅砂	碎石	粒状高炉矿渣	碱性氧炉渣	页岩	电力	沥青煤	柴油	电力	柴油	石膏	石膏	电力	电力	合计
全球变暖	76.0159	0.4452	0.3421	0.4757	0.0326	11.5859	0.5103	0.1612	0.2632	0.0185	0.0138	0.2153	2.7069	0.0012	5.1727	0.0223	0.0116	0.0252	1.9805	-3.21691	96.7832
平流层臭氧消耗	0	4.2025	0.9643	0.9004	0.3376	82.3257	0.9659	0.4551	0.4578	0.032	0.0407	0.252	0.2815	0.0124	6.0542	0.2264	0.0547	0.1189	2.318	-3.76509	96.2350
电离辐射	0	0.4835	0.4555	0.2374	0.0421	92.6107	0.2546	0.7329	0.2887	0.0197	0.0122	0.1388	0	0.0033	3.3356	0.0595	0.0153	0.0332	1.277	-2.07442	97.9256
臭氧形成(人类健康)	0	6.9337	1.8721	1.9598	0.515	65.9783	2.1023	0.6367	0.6303	0.0364	0.0795	0.4945	1.9634	0.0044	11.8795	0.0793	0.09	0.1957	4.5483	-7.38788	92.6113
细颗粒物的形成	0	1.3394	0.2906	0.4102	0.2862	91.398	0.44	0.1333	0.2123	0.0145	0.0112	0.138	0.552	0.0014	3.3176	0.0262	0.05	0.1087	1.2702	-2.06322	97.9366
臭氧形成(陆地生态系统)	0	6.9461	1.8756	1.9596	0.5157	66.1307	2.102	0.6394	0.6546	0.037	0.0797	0.4876	1.9969	0.0045	11.7157	0.0827	0.0902	0.1962	4.4856	-7.286	92.7138
土地酸化	0	0.713	0.2132	0.3333	0.0546	93.8915	0.3576	0.0956	0.1378	0.0095	0.0087	0.1024	0.6226	0.0014	2.4596	0.0255	0.01	0.0219	0.9417	-1.5296	98.47
淡水富营养化	0	0.2174	0.1862	0.2763	0.0161	95.481	0.2964	0.1475	0.2843	0.0276	0.0061	0.0871	0.0149	0.0024	2.0929	0.044	0.0058	0.0126	0.8013	-1.30159	98.6983
海洋酸化	0	0.3254	0.2159	0.5016	0.026	92.494	0.538	0.2241	0.7732	0.0338	0.0068	0.1369	0.1456	0.0005	3.2882	0.0093	0.0068	0.0148	1.2589	-2.04493	97.9549
土地生态毒性	0	0.0136	0.0503	0.0501	0.0022	99.6118	0.0538	0.02	0.0475	0.0008	0.0026	0.004	0.0016	6.59E-05	0.097	0.0012	0.0019	0.0042	0.0372	-0.06039	99.9395
淡水生态毒性	0	0.0221	0.029	0.024	0.0016	98.9748	0.0258	0.0179	0.1295	0.0053	0.0011	0.0221	0.0078	3.87E-05	0.5316	0.0007	0.001	0.002	0.2035	-0.33057	99.6693
海洋生态毒性	0	0.023	0.0327	0.0283	0.0018	98.9902	0.0303	0.0192	0.1314	0.0056	0.0013	0.0211	0.008	5.21E-05	0.508	0.0009	0.0011	0.0024	0.1945	-0.31595	99.684
人类致癌毒性	0	0.4866	0.396	0.2918	0.0312	93.2758	0.313	0.2791	0.6954	0.182	0.0124	0.1162	0.0103	0.0007	2.7926	0.0129	0.0109	0.0238	1.0692	-1.73674	98.2632
人类非致癌毒性	0	0.234	0.0383	0.0476	0.002	99.0726	0.051	0.0229	0.1526	0.0028	0.0015	0.0163	0.0217	6.04E-05	0.3917	0.0011	0.0013	0.0029	0.15	-0.24363	99.9667
土地使用	0	0.7746	5.6088	5.7977	0.0567	76.7538	6.2193	0.362	0.3641	0.0211	0.2499	0.108	0	0.005	2.595	0.0903			0.9935	-1.61383	98.3860
矿产资源耗竭	0	0.0296	0.0237	0.0139	2.3601	96.989	0.0149	0.0163	0.2074	0.02	0.0008	0.0029	0	5.06E-05	0.0702	0.0009	0.0703	0.1529	0.0269	-0.04366	99.9562
化石资源耗竭	0	0.8302	0.6948	0.7835	0.0607	22.425	0.8405	0.3116	0.3946	0.0243	0.0295	0.2728	63.8317	0.0188	6.5539	0.3423	0.0241	0.0524	2.5093	-4.07585	95.9242
耗水量	0	0.8192	1.8475	0.2446	0.0071	95.2396	0.2624	0.2479	0.2033	0.0086	0.0018	0.0324	0	0.0002	0.778	0.0033	0.002	0.0043	0.2979	-0.48383	99.5163

2.4 结果解释

从表2的结果可以看出,水泥生命周期环境影响类别排序为:矿产资源耗竭>土地生态毒性>人类非致癌毒性>海洋生态毒性>淡水生态毒性>耗水量>淡水富营养化>土地酸化>土地使用>人类致癌毒性>海洋酸化>细颗粒物的形成>电离辐射>全球变暖>平流层臭氧消耗>化石资源耗竭>臭氧形成(陆地生态系统)>臭氧形成(人类健康)。生料中的石灰岩煅烧是形成臭氧的主要原因,而臭氧的形成危害人体健康及陆地生态系统。对土地使用的影响中富铜材料占比最大,约为76.75%,其次是沙子和硅砂。对矿产资源耗竭的影响中富铜材料占比最大,约为96.99%,其次是铁矿石。烟煤对化石资源耗竭的影响最大,占比约为63.83%,其次是富铜材料。在所有原材料及能源消耗中,富铜材料对所有类别的影响都较为显著,而碎石、粒状高炉矿渣、碱性氧炉渣、页岩、电力、柴油及石膏对所有类别的影响都较为微弱。

由表2可知,1t水泥产品生命周期中,对总体环境

影响贡献最大的阶段是生料生产环节,其次是熟料烧成环节,分别占总影响的70.39%和29.27%。而在整个生命周期中,各生产阶段对损害类型资源消耗的环境负荷最为显著,其次是人类健康和生态系统健康,且对二者的影响可以忽略不计。

3 水泥生产过程的节能减碳建议

通过上述研究可以得出,水泥生产过程中的碳排放集中在生料生产环节和熟料烧成环节,因此可以利用以下3种方式促进水泥生产过程的减碳。

(1)利用工业固体废弃物替代水泥原料。水泥生产的主要原料为石灰石,而钢铁、火力发电等生产企业每年排放大量的钢渣、矿渣、电石渣和粉煤灰等工业固体废弃物的有效化学成分与水泥熟料较为接近,因此可以替代石灰石作为水泥生产用的原料。

(2)应用新型低碳胶凝材料,由于该材料不含高钙矿物硅酸三钙(C₃S),因此减碳效果显著。如我国自主研发的低碳水泥品种硫铝酸盐水泥(R·SAC)和高贝利

特水泥(HBC),二氧化碳排放相比普通硅酸盐水泥降低了25%~35%。

(3)采用生物质燃料替代技术。替代燃料的来源包括农作物秸秆、稻壳、棉花、高粱、林木、生活垃圾等,生物质替代燃料技术不仅能够帮助水泥熟料规模化生产,还能实现秸秆的无害化处置和循环利用,达到了节能减排的效果。

表3 1t水泥产品生命周期各阶段特征化结果

损害分类	人类健康	生态系统健康	资源消耗	合计	占比
生料阶段	3.73E-05	5.52E-08	0.722415	3.27E+01	70.39%
	1.39E-05	4.71E-08	0.596817		
	1.72E-05	5.06E-08	0.543697		
	6.75E-06	3.95E-09	0.41558		
	0.004754	5.07E-06	29.29446		
	1.84E-05	5.43E-08	0.58323		
	6.49E-06	1.27E-08	0.234509		
	1.37E-05	1.86E-08	0.249246		
	1.17E-06	1.27E-09	0.012909		
	4.98E-07	1.75E-09	0.026994		
	6.56E-06	1.28E-08	0.059272		
熟料阶段	4.82E-05	1.26E-07	12.17079	1.36E+01	29.27%
	5.07E-08	1.17E-10	0.018419		
	0.000158	3.08E-07	1.424038		
	6.86E-06	2.0688E-08	0		
	0.000629	1.8971E-06	0		
	0.000366	1.1033E-06	0		
	1.02E-07	3.0802E-10	0		
水泥阶段	1.29E-06	9.24E-10	0.032352	6.48E-01	1.39%
	2.82E-06	2.01E-09	0.070353		
	6.03E-05	1.18E-07	0.545218		
移动源	1.86E-06	5.6106E-09	0	0.335505	0.72%
	9.24E-07	2.13E-09	0.335502		
余热发电	-9.80E-05	-1.92E-07	-0.88561	-8.86E-01	
合计	0.006053	8.72E-06	46.4502	46.45626	

4 结束语

根据LCA的基本原理及实施步骤,可以利用LCA分析软件SimaPro研究水泥产品生产过程的环境影响情况,分析主要环境影响环节,改善生产过程及产品的绿色性能,从而提升产品的整体环保特性,同时也可以进一步节约成本,缩短水泥产品的生产周期。本研究也存在一些不足之处,由于原始数据缺乏完整性,直接影响了生命周期评价结果的准确性,使得评价结果与实际情况存在一定差异。

参考文献

- [1]Petek Gursel, Eric Masanet, Arpad Horvath, Alex Stadel. Life-cycle inventory analysis of concrete production: A critical review[J]. Cement and Concrete Composites, 2014, 51.
- [2]M. B. Ali, R. Saidur, M. S. Hossain. A review on emission analysis in cement industries[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2011, 15(5).
- [3]国际标准化组织. EN ISO14040-2006, 环境管理——生命周期评估原则和框架: ISO 14040-2006[S].
- [4]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.
- [5]孟祥宇. 污水处理厂的生命周期评价[D]. 合肥: 合肥工业大学, 2009.
- [6]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.
- [7]Helias A. Udo de Haes, Olivier Jolliet, Greg Norris, Konrad Saur. UNEP/SETAC life cycle initiative: background, aims and scope[J]. The International Journal of Life Cycle Assessment, 2002, 7(4).
- [8]向宁, 王礼茂, 屈秋实, 等. 基于生命周期评估的海、陆风电系统排放对比[J]. 资源科学, 2021, 43(4): 745-755.