

刘娜,李丽,闫大海,等.水泥窑共处置低品质包装废物的生命周期评价[J].环境科学研究,2012,25(6):724-730.

LIU Na, LI Li, YAN Dahai, et al. Life cycle assessment of co-processing poor quality packaging in a cement kiln [J]. Research of Environmental Sciences, 2012, 25(6): 724-730.

水泥窑共处置低品质包装废物的生命周期评价

刘 娜^{1,2}, 李 丽¹, 闫大海¹, 王 琪¹, 汪群慧², 陈德平²

1. 中国环境科学研究院固体废物污染控制技术研究所, 北京 100012

2. 北京科技大学土木与环境工程学院, 北京 100083

摘要: 以低品质包装废物为典型固体废物开展水泥窑共处置试烧试验。以生命周期评价(LCA)方法为研究手段,对水泥窑共处置技术的环境影响进行评价,并且与常规水泥熟料生产过程进行比较。通过试验和资料调研,获得所有生命周期阶段的能量和物质输入、输出以及环境外排数据,利用 SimaPro7.1 软件进行处理,得出相应的环境影响潜值。结果表明:①在水泥熟料生产的全生命周期过程中,对环境影响所占比重最大的是生产阶段,共处置低品质包装废物可以使环境影响潜值降低 10.65% (从 263 Pt 降至 235 Pt),主要表现在无机物对人体的损害和酸化/富营养化方面。②从全生命周期来看,共处置低品质包装废物使环境影响潜值降低了 8.68% (从 334 Pt 降至 305 Pt),主要表现在无机物对人体的损害和酸化/富营养化方面的降低,二者的环境影响潜值分别降低了 11.00% 和 15.70%。

关键词: 水泥窑共处置; 包装废物; 生命周期评价(LCA)

中图分类号: X705 **文献标志码:** A **文章编号:** 1001-6929(2012)06-0724-07

Life Cycle Assessment of Co-Processing Poor Quality Packaging in a Cement Kiln

LIU Na^{1,2}, LI Li¹, YAN Da-hai¹, WANG Qi¹, WANG Qun-hui², CHEN De-ping²

1. Research Institute of Solid Waste Management, Chinese Research Academy of Environmental Sciences, Beijing 100012, China

2. Civil and Environmental Engineering Institute, Beijing University of Science and Technology, Beijing 100083, China

Abstract: The environmental impacts of co-processing technology in a cement kiln were evaluated by investigating the life cycle of co-processing poor quality packaging in a cement kiln. Life cycle assessment (LCA) was used for analysis in the study, and the result was compared with those obtained during normal production. Data on mass, energy flux and environmental emissions during all stages of the life cycle were obtained from experiments and the literature, and the corresponding environmental impact values were analyzed using the software SimaPro7.1. The results showed: 1) Over the entire life cycle of cement production, the environmental impact was the greatest during the production period. During this period, the environmental impact value could be reduced by 10.65% (from 263 Pt to 235 Pt) by co-processing poor quality packaging waste; the change was mainly from the reduction of damage from inorganic substances and acidification/eutrophication. 2) Over the entire life cycle, the environmental impact value could be reduced by 8.68% (from 334 Pt to 305 Pt) by co-processing poor quality packaging waste. This reduction was mainly due to the lowering of damage to human health and the level of acidification/eutrophication, whose environmental impact values were decreased by 11.00% and 15.70%, respectively.

Key words: co-processing in cement kiln; packaging waste; life cycle assessment (LCA)

低品质包装废物回收难度大、再利用价值低,其

收稿日期: 2011-08-31 修订日期: 2012-02-17

基金项目: 国家“十一五”科技支撑计划项目(2006BAC02A13)

作者简介: 刘 娜 (1985-), 女, 河北故城人, liuna0502@yahoo.com.cn.

* 责任作者, 李丽(1975-), 女, 河北献县人, 副研究员, 博士, 主要从事固体废物管理与资源化技术研究, li_li@craes.org.cn

主要来源为一次性饭盒和废塑料袋。调查显示,我国城市包装废物在质量上占城市生活垃圾的 1/3,在体积上则达到 1/2,并且每年以 10% 的速度递增^[1]。塑料包装体积大、难降解(自然降解周期在 200 a 以上)^[2-3],并且对环境危害极大。由于水泥窑内温度高、热容量大、气体停留时间长,不易产生二噁英类污染物,其碱性气氛可以有效固定酸性气体,是固体废

物理理想的处理方式^[6-7]。将低品质包装废物进行预处理后制成 RDF(Refuse Derived Fuel, 废物衍生燃料), 在水泥生产过程中替代部分煤, 其焚烧灰渣可作为水泥原料^[8-10], 达到废物资源化利用的目的。Tanna^[11]指出, 利用废弃物作为水泥窑二次燃料的益处包括节约不可再生燃料, 减少由于煤燃烧产生的 CO₂、SO₂、NO_x 和甲烷等污染物的排放, 减少废物的处置费用, 同时给水泥厂带来经济效益, 实现经济、社会、环境 3 个效益的统一^[12-13]。

该文采用生命周期评价(LCA)方法, 对水泥厂共处置低品质包装废物过程和水泥常规生产过程进行评价, 将结果进行对比, 考察水泥窑共处置低品质包装废物的环境影响^[14-16], 评估该技术的可行性, 以期宏观决策及相关法规的制订提供理论依据。

1 研究内容

低品质包装废物中塑料占 42.55%, 纸类占 18.85%, 织物占 4.07%, 玻璃占 3.89%, 其他惰性物质占 30.64%; 含水率 24.38%, 挥发分 35.45%, 灰分 32.72%, 固定碳 7.45%, 热值为 6 830 kJ/kg。基于 ISO14040-14043 中介绍的生命周期评价理论^[17]分 4 步进行评价: ①确定生命周期评价的目的、范围和系统边界; ②清单分析; ③影响评价; ④结果解释。

采用 SimaPro7.1 软件分别处理 2 个过程中各生命周期阶段的物耗、能耗和环境外排量, 得出各环境影响潜值; 选用 Eco-indicator 99^[18] 环境影响评价方法对其进行评价, 将环境影响归结到 11 个类型: 气候变化、臭氧层破坏、致癌物、有机物对人体损害、无机物对人体损害、辐射、生态毒性、酸化/富营养化、土地占用、矿产资源、化石燃料。

2 研究方法

2.1 目的和研究范围

2.1.1 目的

在不影响产品性能和炉内气氛的前提下投加 RDF 替代部分煤, 使生产过程中煤、电和原材料的消耗量发生改变, 进而改变对环境的影响。评价的主要目的是通过 RDF 试烧试验, 对水泥熟料生产的全生命周期过程进行环境影响评价, 并与常规生产的全生命周期过程进行对比。

2.1.2 功能单位

为了确保分析结果的可比性, 取 100 t 水泥熟料为 1 个功能单位^[19], 所有数据以该功能单位为准进行换算。

2.1.3 研究范围

研究范围的界定: 从原材料的生产和加工、能源的生产、原材料和能源的运输、原材料预处理直至生料粉磨、生料煅烧为止, 即从自然环境向企业投入原材料到加工成成品水泥熟料的整个过程。这 2 个过程在水泥均化直至废弃阶段的环境影响基本相同, 不在研究范围内^[20]。生命周期评价的范围如图 1 所示, 其中虚线部分不存在于水泥常规生产过程。

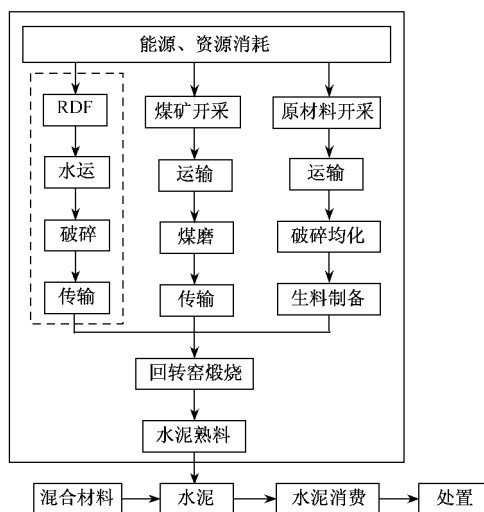


图1 水泥熟料生产生命周期评价范围

Fig. 1 Life cycle assessment scale of cement production

2.2 清单分析

清单数据分为 2 类, 即背景数据和前景数据。背景数据主要由科研机构或企业通过数据调研, 然后根据整个区域的经济技术发展水平修正编制而成的基础数据^[21]。电能的背景数据采用刘夏璐等^[22]编制的我国火力发电单位售电(1 kW·h)排放量的生命周期清单(见表 1), 原煤的背景数据采用袁宝荣等^[23]编制的我国单位化石能源(1 kg 原煤)生产的全生命周期清单(见表 2)。RDF 来自人工分拣, 没有能源消耗及污染物排放。

前景数据的获取方式:

a) 原材料获取阶段。原材料使用量来自水泥厂的试烧试验, 该水泥厂水泥熟料生产能力为 5 000 t/d, 采用五级旋风预热器、预分解炉和回转窑的新型干法水泥工艺, 试烧过程中 RDF 投加量为 6 t/h。砂页岩、铁质原料在常规生产中的消耗量分别为 17.29 和 5.46 t, 在共处置 RDF 中的消耗量分别为 17.18 和

表 1 我国火力发电单位售电的生命周期清单^[23]

Table 1 Life cycle inventory related to electricity in China

kg/kW·h

资源能源	原煤	原油	天然气 ¹⁾	铁矿	铝土矿	水	沙石	石灰石	高炉煤渣
消耗量	5.28×10^{-1}	3.03×10^{-3}	1.30×10^{-4}	1.14×10^{-3}	2.21×10^{-4}	3.29	3.46×10^{-3}	6.96×10^{-3}	1.15×10^{-4}
污染物	CO ₂	SO ₂	NO _x	TSP	CH ₄	废气	COD _{Cr}	废水	固体废物
排放量	1.12	6.73×10^{-3}	2.79×10^{-3}	1.49×10^{-3}	2.54×10^{-3}	4.52	2.43×10^{-3}	1.2	1.84×10^{-1}

注: 1) 天然气消耗量的单位为 m³。以下表注同表 1。

表 2 我国单位原煤生产的生命周期清单^[23]

Table 2 Life cycle inventory related to raw coal in China

kg/kg

能源	原煤	原油	天然气 ¹⁾						
消耗量	1.00	8.59×10^{-4}	5.13×10^{-8}						
污染物	CO ₂	SO ₂	NO _x	CO	CH ₄	烟尘	液体废物	固体废物	
排放量	6.19×10^{-3}	7.45×10^{-6}	4.29×10^{-5}	5.17×10^{-6}	9.32×10^{-3}	9.07×10^{-4}	0.37	4.92×10^{-2}	

5.43 t。由于国内缺乏砂页岩的相关数据,并且砂页岩的用量较少,故暂不考虑其清单数据。铁质原料为硫酸渣,属于化工废渣,其获取过程没有能源消耗及污染物排放。石灰石来自水泥厂自有矿山,开采 1 t 石灰石约消耗电量 0.93 kW·h,消耗石灰石矿 1.15 t,主要污染物为粉尘,其排放清单来自文献 [24]。原材料获取阶段生命周期清单见表 3。

b) 运输阶段。运输过程产生的环境负荷由运输负荷量乘以单位运输环境负荷计算得出。石灰石来

自厂区矿山,运输过程可忽略不计。砂页岩的运输选用 20 t 载货卡车^[23],运输距离为 20 km,单位运输负荷只考虑运输工具的运行阶段和上游阶段,其环境外排计算模型选择 US EPA(美国国家环境保护局)的 MOBILE^[24]模型,暂不考虑运输时二次扬尘的环境影响^[27]。煤和铁质原料的运输选用驳船,运输距离分别为 300 和 459 km,由于目前国内缺少驳船运输的相关数据,因此采用欧洲 Ecoinvent 数据库中数据近似代替。清单数据见表 4、5。

表 3 原材料获取阶段生命周期清单

Table 3 Life cycle inventory of raw materials

kg

项目	石灰石 ^[24]	石灰石矿	电 ²⁾	环境外排		
				PM _{>10}	PM _{2.5~10}	PM _{<2.5}
常规生产	1.23×10^5	1.41×10^5	1.23×10^2	6.95	2.48	0.50
共处置 RDF	1.22×10^5	1.40×10^5	1.14×10^2	6.91	2.47	0.49

注: 2) 电的单位为 kW·h。下同。

表 4 运输阶段单位运输负荷量的生命周期清单

Table 4 Life cycle inventory of transport for

kg/(t·km)

项目	一次能源消耗			环境外排						
	原煤	天然气 ¹⁾	原油	CO ₂	SO ₂	NO _x	CH ₄	CO	NM VOC	PM ₁₀
20 t 卡车	6.87×10^{-4}	1.14×10^{-6}	1.90×10^{-2}	1.43×10^{-1}	4.75×10^{-5}	1.01×10^{-3}	1.18×10^{-5}	2.03×10^{-4}	6.90×10^{-5}	1.92×10^{-5}
驳船	3.20×10^{-3}	9.34×10^{-4}	1.04×10^{-2}	4.12×10^{-2}	6.13×10^{-5}	4.82×10^{-4}	4.96×10^{-5}	6.94×10^{-5}	4.40×10^{-5}	1.80×10^{-5}

c) 生产阶段。该阶段数据来自试烧试验,生产 100 t 水泥熟料常规生产对煤、电的消耗量分别为 14.34 t 和 6 202 kW·h;共处置 RDF 对煤、电的消耗量分别为 14.07 t 和 6 252 kW·h,消耗 RDF 2.84 t,清单数据见表 6。

2.3 影响评价

利用生命周期评价软件 SimaPro7.1,选用 Eco-indicator 99 评价方法,对常规生产和共处置 RDF 2 种水泥熟料生产过程中的原材料获取阶段、运输阶段和生产阶段进行环境影响评价,结果如图 2 所示。

从图 2 可以看出,在水泥熟料生产的全生命周期中,生产阶段对环境的影响占整个生命周期的 77%

表 5 运输阶段的生命周期清单
Table 5 Life cycle inventory of transport

运输对象		砂页岩		煤		铁质原料	
		常规生产	共处置 RDF	常规生产	共处置 RDF	常规生产	共处置 RDF
一次能源消耗	原煤	2.38×10^{-1}	2.36×10^{-1}	13.8	13.5	8.03	7.97
	天然气 ¹⁾	3.94×10^{-4}	3.92×10^{-4}	4.02	3.94	2.34	2.33
	原油	6.57	6.54	44.7	43.9	26.1	25.9
环境外排	CO ₂	49.5	49.2	177	174	103	103
	SO ₂	1.64×10^{-2}	1.63×10^{-2}	2.64×10^{-1}	2.59×10^{-1}	1.54×10^{-1}	1.53×10^{-1}
	NO _x	3.49×10^{-1}	3.47×10^{-1}	2.07	2.03	1.21	1.20
	CH ₄	4.08×10^{-3}	4.06×10^{-3}	2.13×10^{-1}	2.09×10^{-1}	1.24×10^{-1}	1.24×10^{-1}
	CO	7.02×10^{-2}	6.98×10^{-2}	2.98×10^{-1}	2.93×10^{-1}	1.74×10^{-1}	1.73×10^{-1}
	NM VOC	2.39×10^{-2}	2.37×10^{-2}	1.89×10^{-1}	1.86×10^{-1}	1.10×10^{-1}	1.10×10^{-1}
	PM ₁₀	6.64×10^{-3}	6.60×10^{-3}	7.74×10^{-2}	7.60×10^{-2}	4.52×10^{-2}	4.48×10^{-2}

表 6 生产阶段的生命周期清单
Table 6 Life cycle inventory of production

项目		常规生产	共处置 RDF
一次能源、资源消耗	原煤	1.73×10^4	1.71×10^4
	原油	3.20×10	3.19×10
	天然气 ¹⁾	8.20×10^2	8.26×10^2
	RDF	0	2.84×10^3
	水	2.01×10^4	2.02×10^4
	沙石	2.15×10	2.16×10
	铝土矿	1.37	1.38
	石灰石	4.32×10	4.35×10
	铁矿	7.07	7.13
环境外排	CO ₂	7.11×10^3	7.17×10^3
	CO	7.31	7.80
	SO ₂	4.30×10	4.32×10
	NO _x	4.76×10	1.97×10
	HF	3.88×10^{-3}	1.26×10^{-3}
	CH ₄	1.83×10^2	1.80×10^2
	VOC	1.09×10^{-2}	1.09×10^{-2}
	TSP	9.90	9.57
	二噁英	2.13×10^{-12}	9.43×10^{-13}
	氨氮	1.59×10^{-3}	1.56×10^{-3}
	BOD ₅	9.52×10^{-3}	9.35×10^{-3}
	COD _{Cr}	9.07×10^{-2}	2.03×10^{-2}
	液体废物	5.31×10^3	5.21×10^3
	固体废物	7.06×10^2	6.92×10^2

以上,远远大于原材料获取阶段和运输阶段,而运输阶段对环境的影响为全生命周期的 2.25% 以下,因此在运输阶段驳船的数据清单使用 Ecoinvent 数据库中的数据替代本地数据的做法是可行的. 共处置 RDF 时生产阶段的环境影响潜值为 235 Pt,比常规生产的 263 Pt 降低了 10.65%.

对生产阶段进行环境影响分类评价,以便对其作更直观清晰的比较,结果如图 3 所示. 由于计算结果显示致癌物、有机物对人体损害、臭氧层破坏、土地占

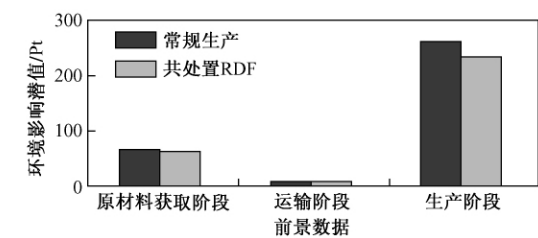


图 2 原材料获取阶段、运输阶段、生产阶段的生命周期评价比较

Fig. 2 Environmental impact comparison of raw material, transport and production

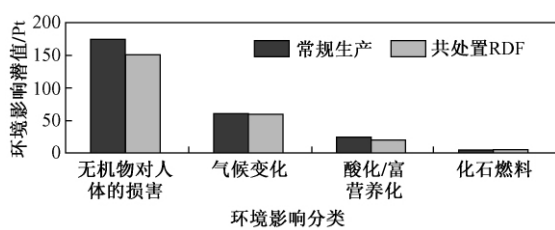


图 3 生产阶段的环境影响分类评价

Fig. 3 Environmental impact categories during the stage of production

用、生态毒性、矿产资源和辐射的环境影响所占整个生命周期的比例过小(低于 1%), 因此图 3 中不做这 7 个方面的说明^[28-30].

从图 3 可以看出,生产阶段的环境影响主要集中在无机物对人体的损害、气候变化、酸化/富营养化和化石燃料 4 个方面. 共处置 RDF 使无机物对人体的损害和酸化/富营养化的环境影响潜值降低,而气候变化和化石燃料的环境影响潜值变化不大. 分别计算烟气排放、电和煤的环境影响潜值,结果如表 7 所示.

表 7 生产阶段环境影响分类评价

Table 7 Environmental impact categories during the stage of production Pt

影响类别	常规生产				共处置 RDF			
	合计	烟气排放	电	煤	合计	烟气排放	电	煤
无机物对人体损害	173.44	69.70	102.00	1.74	150.21	45.50	103.00	1.71
气候变化	59.96	0.06	39.90	20.00	59.79	0.07	40.02	19.70
酸化/富营养化	24.66	13.20	11.10	0.36	20.33	8.77	11.20	0.36
化石燃料	4.83	0.00	2.88	1.95	4.81	0.00	2.90	1.91
总计	262.89	82.96	155.88	24.05	235.14	54.34	157.12	23.68

由表 7 可知,在常规生产和共处置 RDF 过程中环境影响潜值的变化主要来自烟气排放,电和煤的环境影响潜值变化不大. 由于烟气排放对无机物对于人体的损害和酸化/富营养化贡献较大,导致其环境影响潜值降低. 对常规生产和共处置 RDF 2 种水泥生产过程的全生命周期进行环境影响分类评价,结果如图 4 所示.

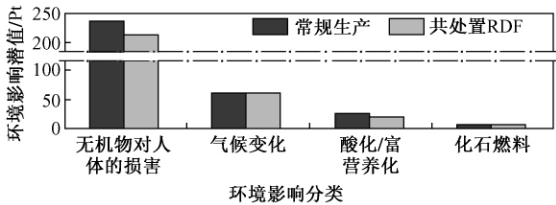


图 4 共处置 RDF 和常规生产的全生命周期环境影响分类评价

Fig. 4 Life cycle assessment of environmental impact categories of cement between two methods

从图 4 可以看出,水泥熟料生产过程中的环境影响主要集中在无机物对人体损害、气候变化、酸化/富营养化和化石燃料 4 个方面. 共处置 RDF 时无机物对人体的损害的环境影响潜值由常规生产的 238 Pt

降至 214 Pt,降低了 10.00%;酸化/富营养化的环境影响潜值由 25.3 Pt 降至 20.9 Pt,降低了 17.40%. 气候变化和化石燃料的环境影响变化不大.

从全生命周期来看,常规生产和共处置 RDF 的环境影响潜值分别为 334 和 305 Pt(如图 5 所示). 由于共处置 RDF 降低了煤和原材料的使用量及污染物的外排量,从而使整个生命周期的环境影响潜值降低了 8.68%.

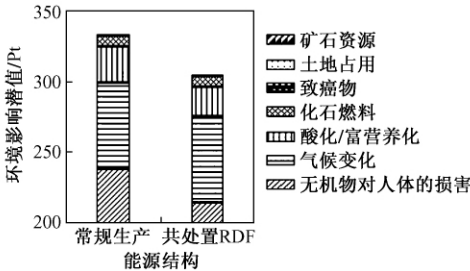


图 5 2 种能源结构的生命周期评价比较

Fig. 5 Life cycle assessment of cement with two methods

3 经济性分析

以 d 为时间单位,对常规生产和共处置 RDF 的成本和产出收益进行比较,结果见表 8.

表 8 成本收益表

Table 8 Cost-benefit table

项目		单价/(元/t)	常规生产		共处置 RDF	
			用量/(t/d)	成本/(元/d)	用量/(t/d)	成本/(元/d)
投资	煤	600	707.5	424 512.0	713.3	427 968.0
	石灰石	0.63	6 661.4	4 196.7	6 836.4	4 306.9
	砂页岩	23	937.5	21 563.4	962.2	22 129.7
	铁质原料	97	296.1	28 717.8	303.8	29 472.5
	电 ³⁾	0.5	310 000	155 000	312 500	155 250
	RDF	250	0	0	144	36 000
收益	水泥熟料	210	4 934.4	1 036 224.0	5 064.0	1 063 440.0
利润				402 234.1	388 312.9	

从表8可以看出,水泥熟料生产过程中使用低品质包装废物作为替代燃料和原材料,导致水泥厂每天损失利润13 921.2元,即每处置1 t低品质包装废物,水泥厂需收取处置费97元才能保证水泥企业的经济利益。由于项目中所用低品质包装废物均为人工分拣,分拣费用偏高,如果使用机械化分拣方式,分拣成本将大大降低,低品质包装废物的处理费用也将相应降低,当分拣费用降低为153元/t时,即可保证共处置低品质包装废物与常规生产的利润相当。

4 结论

a) 常规生产和共处置 RDF 整个生命周期对环境影响的阶段比较分析表明,环境影响比重最大的为生产阶段,二者皆在77%以上,共处置 RDF 可使该阶段的环境影响潜值降低10.65%。

b) 对生产阶段进行环境影响分类评价,共处置 RDF 使无机物对人体的损害和酸化/富营养化方面的环境影响潜值降低,而气候变化的环境影响潜值变化不大。

c) 对全生命周期进行环境影响分类评价,共处置 RDF 使无机物对人体的损害降低了10.00%,酸化/富营养化降低了17.40%,气候变化和化石燃料方面环境影响变化不大。从全生命周期来看,环境影响潜值可降低8.68%。

d) 由于该研究低品质包装废物来自人工分拣,未建立机械化分类流水线,因此导致水泥窑共处置技术成本偏高。在实际应用过程中可利用机械化分拣方式降低低品质包装废物的处置费用。

参考文献(References):

- [1] 刘继永,杨前进,韩新民.瓦楞纸箱全生命周期环境影响评价研究[J].环境科学研究,2008,21(6):105-109.
- [2] ROSS S, EVANS D. The environmental effect of reusing and recycling a plastic-based packaging system[J]. Journal of Cleaner Production,2003,11(5):561-571.
- [3] ZABANIOTOU A, KASSIDI E. Life cycle assessment applied to egg packaging made from polystyrene and recycled paper[J]. Journal of Cleaner Production,2003,11(5):549-559.
- [4] 聂永丰,董保澍.中国固体废物管理与减量化[J].环境保护,1998(2):6-9.
- [5] 谢明辉,李丽,闫大海,等.北京市衍生燃料法处置低品质塑料包装的环境影响[J].环境科学研究,2010,23(10):1284-1290.
- [6] VIRENDRA M, PANDEY S D. Hazardous waste, impact on health and environment for development of better waste management strategies in future in India[J]. Environ Intern,2005,31(3):417-431.
- [7] 周奇,黄后飞,王琪,等.废皮革水泥窑共处置生命周期评价[J].环境科学研究,2009,22(4):506-510.
- [8] VALLS S, VAZQUEZ E. Accelerated carbonation of sewage sludge-cement-sand mortars and its environmental impact[J]. Cement and Concrete Research,2001,31(9):1271-1276.
- [9] MCDUGALL, FORBES R. Life cycle inventory tools: supporting the development of sustainable solid waste management systems[J]. Corporate Environmental Strategy,2001,8(2):142-147.
- [10] ARENA U, MASTELLONE M L, PERUGINI F. The environmental performance of alternative solid waste management options: a life cycle assessment study[J]. Chemical Engineering Journal,2003,96(1):207-222.
- [11] TANNA B. Waste not want not[J]. World Cement,2000,11:3-5.
- [12] ZHAO Wei, VAN DER VOET E, HUPPES G, et al. Comparative life cycle assessments of incineration and non-incineration treatments for medical waste[J]. The International Journal of Life Cycle Assessment,2009,14(2):114-121.
- [13] RENBI B, MARDINA S. The practice and challenges of solid waste management in Singapore[J]. Waste Manage,2002,22(5):557-567.
- [14] US EPA. Life cycle assessment: inventory guidelines and principles[R]. Washington DC: US EPA,1993.
- [15] 周奇,丁明玉,黄后飞,等.水泥窑共处置废农药生命周期评价研究[J].环境科学研究,2008,21(6):62-66.
- [16] SUH S, HUPPES G. Missing inventory estimation tool using extended input-output analysis[J]. The International Journal of Life Cycle Assessment,2002,7(3):134-140.
- [17] ISO/TC 207. Environmental management - life cycle assessment: principles and framework (ISO 14040:2006) [S]. Switzerland: International Standard Organized,2006.
- [18] MARK G, RENILDE S. Eco-indicator 99: methodology report[R]. Netherlands: PRé Consultants,2001:1-75.
- [19] 谢明辉,李丽,黄泽春,等.纸塑铝复合包装处置方式的生命周期评价[J].环境科学研究,2009,22(11):1299-1304.
- [20] CONSOLI F, BOUSTED I. Guideline for life cycle assessment: a code of practice [M]. Sesimbra, Portugal: Society of Environmental Toxicology and Chemistry,1993.
- [21] 谢明辉,李丽,黄泽春,等.典型复合包装的全生命周期环境影响评价研究[J].中国环境科学,2009,29(7):773-779.
- [22] 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.
- [23] 袁宝荣,聂祚仁,狄向华,等.中国化石能源生产的生命周期清单:II.生命周期清单的编制结果[J].现代化工,2006,26(4):59-61.
- [24] 姜睿,王洪涛.中国水泥工业的生命周期评价[J].化学工程与装备,2010,4(4):183-187.
- [25] 刘颖昊,刘涛,沙高原,等.货物运输的生命周期清单模型[J].安徽工业大学学报,2008,25(2):205-207.
- [26] US EPA. User's guide to MOBILE5 [R]. Washington DC: US

EPA,1995.

[27] 张承中,刘立忠,李涛. 单辆机动车二次扬尘量化计算的实验研究 [J]. 环境工程,2002,20(5):38-40.

[28] STOPPATO A. Life cycle assessment of photovoltaic electricity generation [J]. Energy,2008 ,33(2):224-232.

[29] KUMAR S, GAIKAWD S A, SHEKDAR A V, *et al.* Estimation method for national methane emission from solid waste landfills [J]. Atoms Environ,2004 ,38(23):3481-3487.

[30] HARDING K G,DENNIS J S,BLOTTNITZ H V, *et al.* A life-cycle comparison between inorganic and biological catalysis for the production of biodiesel [J]. Journal of Cleaner Production,2007 ,16(13):1368-1378.

(责任编辑: 潘风云)

科技期刊常用量的符号、名称及释义

符号	量名称	单位	说明
c	浓度、物质的量浓度	mol/m^3	某物质的质量除以混合物的体积,如污染物 A 的浓度应表示为 $c(\text{A})$
ρ	质量浓度	kg/L	某物质的质量除以混合物的体积,如污染物 A 的质量浓度应表示为 $\rho(\text{A})$
w	质量分数	$1,\text{mg}/\text{kg}$	某物质的质量与混合物的质量之比,如污染物 A 的质量分数应表示为 $w(\text{A})$
φ	体积分数	$1,\text{mL}/\text{L}$	某物质的体积与混合物的体积之比,如污染物 A 的体积分数应表示为 $\varphi(\text{A})$
n	物质的量	mol	如污染物 A 的量应表示为 $n(\text{A})$

注: 源自 GB 3102.8—1993《物理化学和分子物理学的量和单位》.

声 明

为适应我国信息化建设,扩大本刊及作者知识信息交流渠道,本刊已被中国学术期刊(光盘版) 电子杂志社的中国知网及其系列数据库等检索信息系统收录,并以数字化方式复制、汇编、发行、信息网络传播本刊全文,作者著作权使用费与本刊稿酬一次性给付。如果作者不同意文章被收录,请在来稿时向本刊做出纸面声明,本刊将做适当处理。

特此声明!

《环境科学研究》编辑部