

文章编号:1674-6139(2023)12-0173-06

三种典型废玻璃生命周期环境影响评价研究

陈素红¹, 毕珠洁², 邵俊², 沈笛³, 周宗双博³

(1. 上海电机学院, 上海 201306; 2. 上海环境卫生工程设计院有限公司, 上海 200001; 3. 上海理工大学, 200093)

摘要:采用生命周期评价(LCA)法研究了废碎玻璃、废日用玻璃、废平板玻璃全生命周期环境影响,并在处置阶段对不同处理工艺的环境影响进行比较。通过现场和资料调研的方式,获得所有生命周期阶段能量物质的输入/输出和环境外排数据。结果表明:预处理阶段废碎玻璃的回收利用所使用的工艺环境影响总值最小为 $3.949\ 73\text{E}-05$,废日用玻璃处理技术为 $0.000\ 14$,废平板玻璃处理技术为 $0.000\ 286\ 946$;废日用玻璃处理技术的特征化指标,结果显示,对占比最多的是水生生态毒性比例高达76%。

关键词:废玻璃;生命周期评价;环境影响总值

中图分类号:X820.3

文献标志码:B

Life Cycle Environmental Impact Assessment of Three Typical Waste Glass

Chen Suhong¹, Bi Zhuojie², Yi Jun², Shen Di³, Zhouzong Shuangbo³

(1. Shanghai Dianji University, Shanghai 201306, China;

2. Shanghai Environmental Sanitation Engineering Design Institute Co. Ltd., Shanghai 200001, China;

3. University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China)

Abstract: The life cycle assessment (LCA) method was used to study the environmental impacts of the whole life cycle of waste broken glass, waste daily glass and waste flat glass, and to compare the environmental impacts of different treatment processes in the disposal stage. The input/output of energy substances and environmental outgassing data of all life cycle stages were obtained by means of on-site and data research. The results show that the total environmental impact of the process used for recycling of waste broken glass in the pre-treatment stage is the smallest at $3.949\ 73\text{E}-05$, $0.000\ 14$ for waste daily glass treatment technology, and $0.000\ 286\ 946$ for waste flat glass treatment technology, and the characterization index of waste daily glass treatment technology. The results show that the proportion of aquatic ecotoxicity is up to 76%.

Key words: waste glass; life cycle assessment; environmental impacts

前言

当前,在国家新战略的指导下,城市化进程迅速加快,人民生活水平日益提高,伴随着玻璃制造行业的快速发展,玻璃的需求量也越来越大。作为玻璃

生产和使用的大国,中国每年产生大量的废玻璃,而回收量仅占50%左右,废玻璃无法焚烧,无法在填埋中自然降解,如果将废玻璃加以回收利用则能产生显著的经济和环境效益。因对废玻璃的回收处置是缓解社会经济压力,减轻环境污染的有效途径,符合国家发展循环经济的根本需求。

生命周期评价(Life Cycle Assessment,简称LCA)起源于20世纪60年代末美国可口可乐公司对饮料瓶的选择研究。产品的LCA是一种对产品从原材料采集到产品的生产、运输、销售、使用、回

收稿日期:2023-09-22

基金项目:上海市绿化和市容管理局科学技术项目 G229908
《生活垃圾处理技术碳减排能力分析》

作者简介:陈素红(1984-),女,博士,高级工程师,研究方向:固体废弃物处理与处置。

通信作者:毕珠洁

用和最终处置的整个生命周期阶段中与环境的作用进行系统分析、评价的方法^[1-2]。ISO 对生命周期评价定义是:生命周期评价是对产品系统整个生命周期输入、输出的汇集和评价^[3]。中国正处在 LCA 的发展阶段,目前 LCA 的研究主要集中在针对特定产品、工艺流程及废弃物处置的环境影响上^[4]。

研究借助 LCA 技术工具,拟对废玻璃回收利用的不同种类不同处理工艺的废玻璃进行较为系统的 LCA 评价,量化分析废玻璃在收运处不同阶段所导致环境影响负荷的大小,进一步提出回收处理或者改进的方案,并探索建立相对完善的废玻璃回收利用系统,同时也为有效环保地处理废玻璃提供一定的理论依据。

1 研究内容

选择废碎玻璃、废日用玻璃、废平板玻璃对应的不同的处理工艺为研究对象,基于 ISO14040 - 14043 中介绍的生命周期评价(LCA)理论包括 4 个有机联系的部分^[5]:

(1)目标及范围确定:确定 LCA 的评价目标、研究范围和系统边界;

(2)清单分析:生命周期清单分析(LCI;Life Cycle Inventory)即确定各流程输入(原料、辅料和能源等)和输出(向空气、水、土壤中的排放及固体废物);

①影响评价:生命周期影响评价(LCIA;Life Cycle Impact Assessment)即对清单数据进行定量评价;

②生命周期解释:即对清单分析结果和影响评价结果进行解释说明。

生命周期环境影响评价方法主要有 Eco-indicator 99、EDIP2003、ESP2000、Impact2002 +、以及 Re Ci Pe Endpoint 2016 等。研究主要使用 Simapro(9.0.0.33 分析版)软件的 IMPACT2002 + 研究方法对三种废玻璃的处理工艺开展环境影响的定量研究和评价。

2 研究方法

2.1 功能单位和系统边界

2.1.1 功能单位

功能单元(Function Unit,简称 FU)是产品功能的量化定义,能够为系统的输入与输出提供一个统一的基准,实现系统输入输出的标准化。文章废玻璃功能单位为 1 吨废玻璃。建立三种典型废玻璃回收利用生命周期系统模型,以 1 吨废玻璃为功能单位进行分析。

2.1.2 系统边界

针对废玻璃的回收利用整体工艺,以整厂范围为边界,以废玻璃,水电资源消耗为输入,排放物质为输出。排放物质应以直接排放到大气、水体的物质为准。

2.2 生命周期清单数据来源

根据确定的系统边界,对废玻璃生产过程的资源、能源和原材料的消耗量以及环境排放的原始数据进行收集。

文章废玻璃的各阶段处理工艺及清单数据通过调研来源于第三方机构的现场测量数据、企业内部环境影响评价报告和文献《城市道路两种货车运输的生命周期清单分析》^[5]。企业内部环境影响评价报告主要来源为燕龙基(徐州)再生资源利用有限公司(碎玻璃),林州市爱华玻璃制品有限公司(废日用玻璃)和福建漳平永凯隆新型材料有限公司(废平板玻璃)。同时,对废玻璃的生产和回收利用过程进行调研,获取生命周期清单分析所需的部分基础数据。数据收集的类型主要涉及原材料生产过程、能源生产及使用过程、运输过程和废玻璃处置过程。玻璃制造工艺数据和再生过程数据均直接来源于上述三个厂家数据以及行业文献、行业标准中的数据,利用 Simapro(9.0.0.33 分析版)软件的 IMPACT2002 + 方法进行清单分析,首先分别统计功能单位的产品在每个阶段生产过程中的消耗与排放数

据,最后汇总计算得到该产品的生命周期清单数据。

2.3 清单分析

2.3.1 收运阶段

文章考虑了以下运输方式和距离:收运阶段的运输车辆的动力源为柴油,所以产生尾气中主要的污染物有 CO_2 、 CO 、 NO_x 、 SO_2 等,主要对作业点周围和运输路线两侧局部范围产生一定影响,但由于排放量不大,影响也相对较小。一般情况下,在工地内运行的机械及载重卡车的废气污染影响范围仅局限施工工地内,不影响界外区域。由于工程所在地附近区域地势开阔,大气扩散条件好,工程量较小,对大气环境的影响很小。

文章对废玻璃收运阶段进行了一系列调研,废玻璃在收集点收集之后会运输至就近的中转站或集散场,经过处理再通过船运或者陆运到达处理厂。经调研,假设从中转站或集散场运输至再生处理厂的距离为45 km。重型货车燃油类型为柴油型,满载时运输量为10 t,城市道路货车实际百公里油耗 $38.75 \text{ L}=32.2 \text{ kg}$ 。1 000吨的船舶行驶1公里消耗7.63 kg柴油;根据《中国生活垃圾分类产业的经济学分析》^[6],陆运:水运取8:9。

废玻璃收运阶段输入清单:柴油为 0.0192 kg/t 废玻璃·km;电力为 0.7144 kWh/t 废玻璃·km。

废玻璃收运段输出清单: CO_2 为 0.00100294 t/t 废玻璃、 CO 为 0.00000563 t/t 废玻璃; NO_x 为 0.0000241 t/t 废玻璃; SO_2 为 0.00000241 t/t 废玻璃; N_2O 为 0.000000031 t/t 废玻璃; CH_4 为 0.00000004 t/t 废玻璃; NMOVOC 为 0.00000428 t/t 废玻璃;颗粒物为 0.00000031 t/t 废玻璃。

2.3.2 废玻璃回收处理阶段

2.3.2.1 废碎玻璃预处理工艺的清单分析

(1)数据来源:输入原料为废碎玻璃、水电消耗,排放物质为排放到废气、废水、固废的最终排放量单位数据表。废碎玻璃预处理工艺流程为入料计

量-筛分-破碎-烘干-筛分除金属-光选-储存-出料计量。

(2)指标清单:预处理阶段废碎玻璃输入清单:材料为平板废玻璃和瓶罐废玻璃,均为 0.5 t/t 废玻璃;能源为水 0.005088 t/t 废玻璃、电 6.47 kWh/t 废玻璃、燃气 2.37 立方米/t 废玻璃。

预处理阶段废碎玻璃输出清单主要为废气和废水。废气主要为 SO_2 0.968 t/t 废玻璃、 NO_x 0.996 t/t 废玻璃、烟(粉)尘 5.36 t/t 废玻璃、油烟 0.0183 t/t 废玻璃、粉尘 3.08 t/t 废玻璃;废水主要为废水量 0.003953 t/t 废玻璃、COD 0.202 t/t 废玻璃、SS 0.0403 t/t 废玻璃、氨氮 0.0202 t/t 废玻璃、总磷 0.00202 t/t 废玻璃、动植物油 0.00403 t/t 废玻璃。

2.3.2.2 废日用玻璃回收利用工艺的清单分析

(1)数据来源:输入原料为废玻璃、其他原料、水电消耗,排放物质为排放到废气、废水、固废的最终排放量单位数据,排放到空气中的废气主要为配料搅拌过程中产生的粉尘、熔化过程中产生的含 SO_2 、 NO_x 和烟尘等;水污染物主要为煤气发生炉产生的冷凝废水、废碎玻璃清洗废水。

(2)指标清单:指标清单中的不外排污染类型均按零排放处理。

废日用玻璃处理输入清单主要为废碎玻璃 1 t/t 废玻璃、石英砂 0.091935 t/t 废玻璃、白云石 0.056452 t/t 废玻璃、方解石 0.019355 t/t 废玻璃、长石 0.058065 t/t 废玻璃、纯碱 0.032258 t/t 废玻璃、硝酸钠 0.003548 t/t 废玻璃、澄清剂 0.000613 t/t 废玻璃。能源主要为煤 0.116452 t/t 废玻璃、水 0.089855 t/t 废玻璃、电 109.6774 kWh/t 废玻璃。

废日用玻璃处理输出清单主要为废气和固体废物。废气主要为油烟 $1.90\text{E}-07 \text{ t/t}$ 废玻璃、烟尘 $2.71\text{E}-05 \text{ t/t}$ 废玻璃、 SO_2 0.0005858 Kg/t 废玻璃、 NO_x 0.0017548 t/t 废玻璃;固体废物主要为生

活垃圾 0.000 797 t/t 废玻璃。

2.3.2.3 废平板玻璃回收利用阶段的清单分析

(1)数据来源:废平板玻璃回收处理工艺流程
炉窑 - 静电除尘 - SCR 脱销 - 湿法脱销 - 循环池 -
沉淀池 - 终产物石膏。

(2)指标清单:输入原料废玻璃、其他原料、水
电消耗,排放物质用排放到空气中、水中、固废的最
终排放量单位数据,排放到空气中的废气主要为混
合机上料中产生的粉尘、压延过程中产生的含 SO_2 、
 NO_x 和颗粒物等;水污染物主要为生产生活废水、废
碎玻璃清洗废水。

废平板玻璃处理输入清单:碎玻璃 1 t/t 废玻璃、
石英石 1.071 428 t/t 废玻璃、芒硝 0.004 464 t/t 废玻
璃、纯碱 0.357 143 t/t 废玻璃、石灰石 0.178 571 t/t 废
玻璃、白云石 0.089 286 t/t 废玻璃、长石 0.053 571 t/t
废玻璃、硝酸钠 0.026 786 t/t 废玻璃、五氧化二锑
0.004 464 t/t 废玻璃、液氨 0.007 143 t/t 废玻璃。能
源为水 1.360 714 t/t 废玻璃、电 84.148 74 kWh t/t
废玻璃、液化天然气 0.128 107 t/t 废玻璃。

废平板玻璃处理输出清单主要为废气,包括 SO_2
0.372 963 t/t 废玻璃、 NO_x 2.739 353 t/t 废玻璃、颗粒
物 0.217 601 t/t 废玻璃、氟化物 0.008 571 t/t 废玻璃、
氯化氢 0.214 286 t/t 废玻璃、逃逸氨 0.107 143 t/t 废
玻璃。

2.4 环境影响分析

通过采用 IMPACT2002 + 的方法对资源环境
清单数据进行分析,选取节能减排综合指标中的 8
类(GWP、WS、EP、AP、COD、RI、IWU、CADP)资源
环境指标,使其连接到 4 类(气候变化、生态系统
质量、人类健康、资源消耗)环境损害类型,用环境
损害指标的量化结果来表示资源环境的影响,建
立更加直观易于量化的资源环境评价指标体系,
从而获得更为准确的评价结果,可以减少人为主
观因素的干扰^[7-8]。

利用生命周期软件 Simapro,选用 IMPACT2002

+ 评价方法,对清单数据分类、特征化、归一化和加
权处理计算^[9],分别得到废碎玻璃、废日用玻璃、废
平板玻璃不同处理工艺的环境影响评价。

3 结果与讨论

3.1 环境影响总值分析

对 3 种不同处置工艺下的废玻璃进行全生命
周期环境影响分类评价,通过标准化指标总和与
废玻璃基数参考进行分析,得到三个项目的环境
影响总值。预处理阶段废碎玻璃的回收利用所使
用的工艺环境影响总值最小为 $3.949\ 73\text{E} - 05$,废
日用玻璃处理技术为 0.000 14,废平板玻璃处理技
术为 0.000 286 946。对废玻璃回收处理工艺而言,
预处理阶段废碎玻璃的回收利用的所使用到工艺与
以上两种工艺不同,主要包括破碎、烘干、光选、储
存,所使用到的工艺步骤对环境更为友好。

3.2 特征化分析

3.2.1 废日用玻璃处理工艺特征化

根据废日用玻璃处理技术的特征化指标(如图
1 所示),统计后进行比较,结果显示,其中占比最多
的是水生生态毒性比例高达 76%,占比第二多的为
陆地生态毒性 17%,非可再生能源占比为 6%,其余
部分致癌物质、非致癌物质、呼吸无机物、电离辐射、
臭氧层损耗、呼吸有机物、陆地酸/赡养、土地占领、
水生酸化、水生富营养化、全球变暖、可再生能源、
矿物开采这几项影响很小近似为 0。所以在分析中重点分析

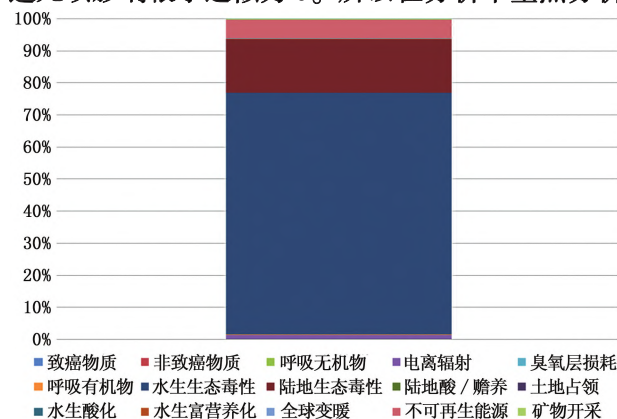


图 1 废日用玻璃处理工艺各特征化指标占比情况

对环境占比系数最大的两项水生生态毒性与陆地生态毒性,对这两项产生的环境影响进行分析优化从而实现环境效益最大化。

水生生态毒性与陆地生态毒性影响指标中(如图 2~图 3 所示),对环境影响最大部分主要出现在工艺中废碎玻璃的处理的环节以及用电部分。其他部分如纯碱、硝酸钠以及水、煤的用量等在生命周期评价中造成的影响微乎其微。因此在该项目中应优化生产工艺减小电量的使用,以及增加原料中其他替代料的占比,降低废玻璃回收对环境的整体影响,优化环境效益。

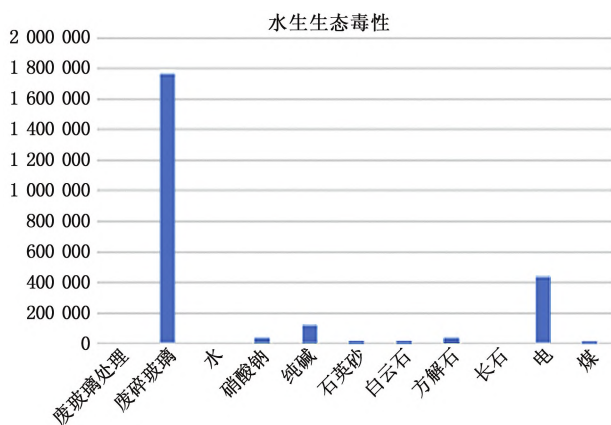


图 2 废日用玻璃处理工艺水生生态毒性

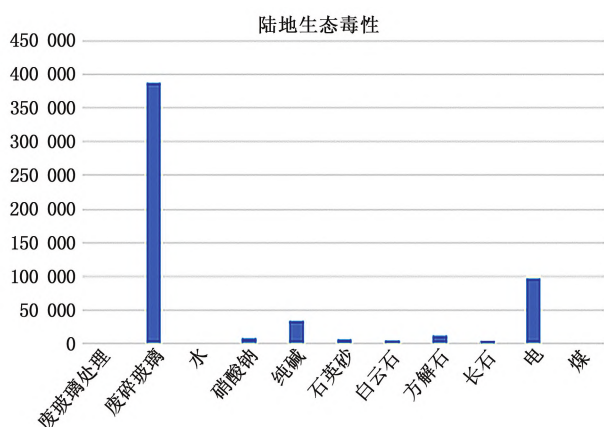


图 3 废日用玻璃处理工艺陆地生态毒性

3.2.2 废平板玻璃处理工艺的特征化

根据废平板玻璃处理工艺的特征化指标(如图 4 所示),统计后进行比较,因为废日用玻璃处理技术使用类似工艺,占比最多的也是水生生态毒性比

例高达 74%,第二的为陆地生态毒性 18%,非可再生能源占比为 5%,其余部分致癌物质、非致癌物质、呼吸无机物、电离辐射、臭氧层损耗、呼吸有机物、陆地酸、土地占领、水生酸化、水生富营养化、全球变暖、可再生能源、矿物开采这几项影响很小近似为 0。结果显示,生态毒性与陆地生态毒性占比远大于其他指标,在分析中重点分析对环境占比系数最大的两项水生生态毒性和陆地生态毒性,对这两项产生的环境影响进行分析优化从而实现环境效益最大化。

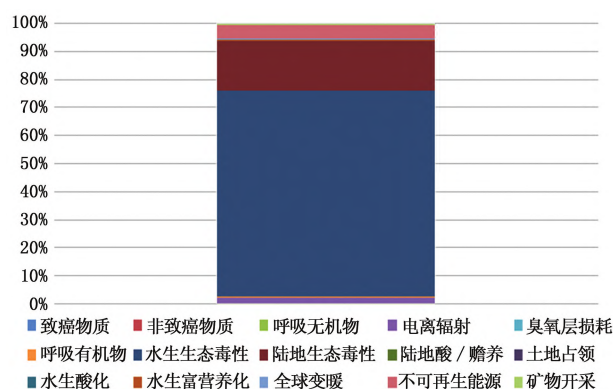


图 4 废平板玻璃处理工艺各特征化指标占比情况

水生生态毒性与陆地生态毒性影响指标中(如图 5~图 6 所示),对环境污染最大的部分主要出现在工艺中废碎玻璃的处理的环节以及纯碱的量,与废日用玻璃处理技术相比纯碱的影响高出很多。而其余部分,如液氨、芒硝等其他配合料以及水电部分对环境的影响并不明显。综上所述废平板玻璃处理技术中应提高长石、白云石等的原材料占比,减少工

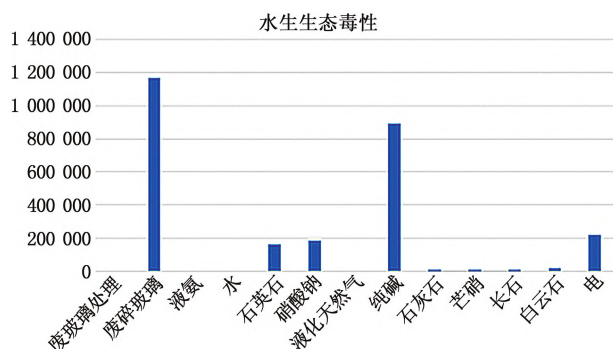


图 5 废平板玻璃处理工艺(水生生态毒性)

艺中纯碱用量,针对这部分进行优化对减少废玻璃回收生命周期环境影响具有显著作用。

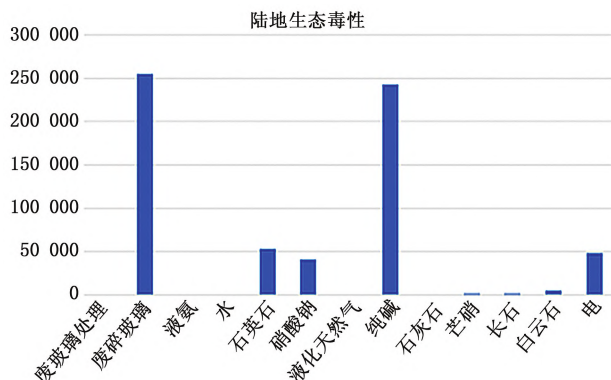


图 6 废平板玻璃处理工艺 (陆地生态毒性)

4 结论

文章用 Simapro 生命周期软件,采用Impact2002 + 的方法对废碎玻璃、废日用玻璃、废平板玻璃三种废玻璃收运处系统进行了全生命周期评价。预处理阶段废碎玻璃的回收利用所使用的工艺环境影响总值最小为 $3.949\ 73\ E - 05$, 废日用玻璃处理技术为 $0.000\ 14$, 废平板玻璃处理技术为 $0.000\ 286\ 946$; 废日用玻璃处理技术的特征化指标,结果显示,占比最多的是水生生态毒性比例高达 76%。通过该项研究,可以衡量不同环节对产品产生生命周期成本的贡献程度,为实现产品的经济利润最大化以及环境影响最小化提供决策支持。

参考文献:

- [1]李泉鑫,李俊杰,龚先政,等. 两条不同技术路线的煤制聚丙烯生命周期评价[J]. 煤炭转化,2022,45(4):1-8.
- [2]操家顺,赵嘉楠,操乾,等. 基于生命周期评价的两种城市生活垃圾处理模式对比[J]. 环境保护科学,2019,45(6):92-100.
- [3]高翔宇. 基于日本生命周期评价(LCA)方法的思考 - 以东洋制罐公司对饮料包装 LCA 分析为例[J]. 环境影响评价,2021,43(1):75-96.
- [4]Rebitzer G, Kekvall T, Frischknech R, et al. Life cycle assessment Part1: framework, goal and scope definition, inventory analysis, and applications [J]. Environmental International,2004,30(5):701-720.
- [5]马丽萍,王志宏,龚先政,等. 城市道路两种货车运输的生命周期清单分析[C]. 北京国际材料周暨中国材料研讨会,2006.
- [6]尉薛菲. 中国生活垃圾分类产业的经济分析[D]. 北京:中国社会科学院大学(研究院),2020.
- [7]赵昱,霍李江. 化妆品销售包装盒生命周期评价[J]. 包装工程,2020,41(21):131-137.
- [8]李德祥,叶蕾,支朝晖,等. 三类典型一次性外卖餐盒的全生命周期评价[J]. 现代食品科技,2022,38(1):233-238.
- [9]吕艳娜,姚远,郭鑫,等. PBAT 基包装袋生命周期评价[J]. 包装学报,2021,13(3):44-50.