

循环包装箱全生命周期碳足迹计算方法研究

任姝珩, 张媛, 朱磊, 刘笑, 江东何
(北京印刷学院 机电工程学院, 北京 102600)

摘要: **目的** 针对目前循环箱碳足迹的计算缺乏统一标准且相关研究较少, 使循环箱的环保价值存疑的问题, 本文对循环包装箱的碳足迹进行研究, 旨在建立一种适用于循环包装的基于生命周期评价(LCA)方法的碳排放计算模型。**方法** 基于全生命周期评价方法, 参考国内A循环包装企业B2B应用场景, 采用eFootprint软件及数据库量化分析。由于聚丙烯材料具有可循环利用的特点, 在快递循环包装中广泛应用, 本文以聚丙烯材料的循环箱为例进行碳足迹的研究。以1 m²的循环快递包装箱为功能单位, 采用“从摇篮到坟墓”的方法对其生产、运营、回收等过程的物耗、能耗及环境排放进行环境影响量化比较。**结果** 研究评价分析了各个单元过程中对全球变暖潜值这一环境指标的贡献值。结果显示, 循环包装箱碳排放贡献主要来源于4个方面: 循环使用过程运输排放, 约占总排放的57.95%; 其次为原材料聚丙烯, 约占总排放的24.25%; 电力排放包括生产、清洗2个阶段的电力, 占总排放的11.71%; 报废后垃圾焚烧处理过程排放, 占总排放的5.33%。使用近50次的二氧化碳当量为9.854 1 kg/m²。**结论** 循环包装单次使用排放低于相同面积单位5层瓦楞纸箱的碳排放, 说明在理想条件下循环包装具有较高的环保价值。

关键词: 快递循环包装; 生命周期评价; 碳足迹; 聚丙烯材料

中图分类号: TB484.3 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3563(2023)13-0245-08

DOI: 10.19554/j.cnki.1001-3563.2023.13.029

Calculation Method of Life Cycle Carbon Footprint of Circulating Packaging

REN Shu-heng, ZHANG Yuan, ZHU Lei, LIU Xiao, JIANG Dong-he

(School of Mechanical and Electrical Engineering, Beijing Institute of Graphic Communication, Beijing 102600, China)

ABSTRACT: Based on the lack of uniform standards for calculation of carbon footprint of circulating boxes and the lack of relevant research, which make the environmental value of circulating boxes questionable, the work aims to study the carbon footprint of circulating boxes, to establish a carbon emission calculation model based on the life cycle assessment (LCA) method applicable to circulating packaging. Based on the full life cycle assessment method and referring to the B2B application scenarios of domestic circulating packaging enterprise A, eFootprint software and database were used for quantitative analysis. Due to the recyclability of polypropylene material, it was widely used in circulating packaging of express. With the circulating box of polypropylene material as an example, the carbon footprint was studied. With a 1 m² circulating express packaging box as the functional unit, the method of "from cradle to grave" was adopted to quantitatively compare the material consumption, energy consumption and environmental impact of its production, operation, re-

收稿日期: 2023-02-02

基金项目: 北京市教委-市自然科学基金委联合资助项目(KZ202210015020)

作者简介: 任姝珩(1998—), 女, 硕士生, 主攻物流包装循环调度和碳足迹。

通信作者: 朱磊(1982—), 男, 博士, 高级工程师, 主要研究方向为智能循环包装、生物降解材料。

cycling and other processes. The contribution value of each unit process to the global warming potential, an environmental indicator, was evaluated and analyzed. The results showed that the contribution of carbon emissions from circulating packaging mainly came from four aspects: the transport emissions from the recycling process, accounting for 57.95% of the total emissions; followed by raw material polypropylene, accounting for 24.25% of the total emissions; electric power emission, including power generated in production and cleaning, accounting for 11.71% of the total emissions; and waste incineration process after scrapping, accounting for 5.33% of the total emissions. The CO₂ equivalent of using nearly 50 times was 9.854 1 kg/m². The carbon emission in single use of the circulating packaging is far lower than that of the 5-layer corrugated box with the same area unit, indicating that the recycling packaging has high environmental protection value under ideal conditions.

KEY WORDS: circulating packaging of express; life cycle assessment; carbon footprint; polypropylene material

随着电商行业的蓬勃发展,中国快递行业的数额激增,2020年我国快递业务量达到了833.6亿件^[1]。快递包装已经成为城市垃圾新增的主要原因,是塑料污染的重要来源。2020年1月的国家发改委等发布的《关于进一步加强塑料污染治理的意见》中提出“以连锁商超、大型集贸市场、物流仓储、电商快递等为重点”“积极推广可循环、可折叠包装产品和物流配送器具”。2021年,国务院办公厅印发了《2030年前碳达峰行动方案》。为顺应一系列减排政策,以聚丙烯为主要原料的可循环利用的快递包装箱逐步发展^[2]。截至目前,关于循环包装箱碳排放的计算缺乏统一的标准,且相关领域的研究较少,存在着关于循环包装是否真正环保等种种疑问。要解决这些问题,就需要研究循环包装物的碳足迹。

研究循环包装箱的环境影响大小,可以借助生命周期评价(Life Cycle Assessment, LCA)方法^[3-5]进行量化分析。国内外许多的学者使用生命周期评估方法对包装物的碳足迹进行研究。

年鹤等^[6]研究瓦楞纸箱生产碳足迹的计算方法,计算了3种瓦楞纸箱生产的碳排放量并进行了分析。耿会君等^[7]归纳了快递包装箱循环利用中产生碳足迹的环节,分析了存在的问题并提出了减碳的对策。王志慧等^[8]对纸塑铝复合包装的生命周期碳足迹进行研究,得出纸板、铝箔和塑料的生产碳排放达80%以上的结论。潘生林等^[9]研究跨境再生HDPE生产塑料罐包装的碳足迹,证明再生塑料资源的利用可明显改善生产过程的碳足迹。赵昱等^[10]评价了白纸板 and 聚丙烯2种化妆品包装盒的环境影响,得出两者中首选材料是白纸板的结论。巩桂芬等^[11]对比了2款包装箱,得出钢边箱比传统木箱更具有环境友好性的结论。孙丹妮等^[12]研究了牛皮淋膜纸和聚乙烯(PE)2种书籍包装袋的环境影响并分析了两者利弊。Robertson等^[13]为Zespri评估猕猴桃包装和运输供应链在日本和德国销售的生命周期碳足迹,提出减少二次包装、长途运输使用火车以及提高包装回收率的建议,以达到减少排放的目的。

1 背景与假设

1.1 循环箱生产模型

由于聚丙烯材质的特殊性,循环箱体能够重复利用,废弃后仍能回收利用。生产过程如下:以全新和再生的聚丙烯(Polypropylene, PP)树脂颗粒为原料,按一定比例加入混料机混料后吸入料斗中,经电力加热成熔融状态后挤出,经冷却水冷却定型后由片材机收卷;随后,片材经成型机压制、模切机模切定型后进行油墨印刷;最后使用声波热熔技术焊接成箱。

1.2 循环箱运营模型

循环箱运营的业务场景主要涉及B2B和B2C这2种模式。由于国内目前针对循环箱的整体运营模式及回收体系尚不成熟,B2C的运营模式目前在企业内实际应用较少。本次研究的循环箱使用过程均在企业B2B运营模式^[14]下,流程如图1所示。

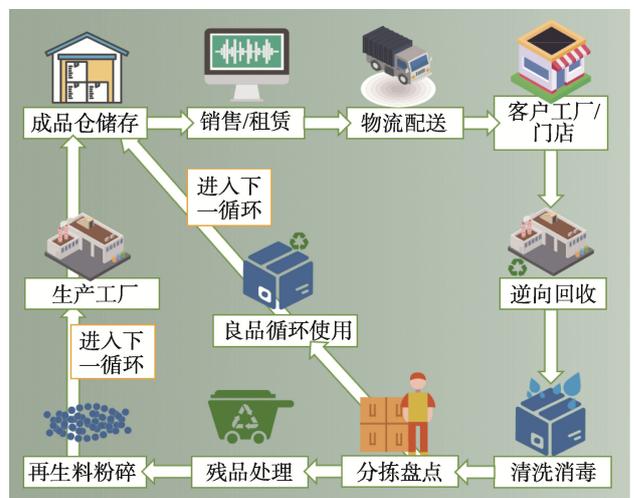


图1 循环包装箱 B2B 循环运营模式
Fig.1 B2B circulation operation mode of circulating packaging boxes

2 建模与数据收集

2.1 研究方法与流程

研究采用 LCA 软件 eFootprint 建立生命周期模型, 运用软件中手动建模方式, 利用企业实景数据和软件系统数据库进行清单数据关联和生命周期数据追溯。对快递循环包装的产品碳足迹而言, 遵循从评价模型构建, 到模型评估计算, 最终针对碳足迹分布和计算结果, 提出低碳改进措施。

2.2 目标与范围定义

研究数据以 1 m² 聚丙烯板材所生产的快递循环包装箱产品为数据单元进行基础数据清单的收集, 所研究的碳足迹范围是从摇篮到坟墓的^[15]。B2B 模式中企业使用主要在固定地点, 排放很少且数据不易收集, 因此本文忽略了消费者(企业)使用部分排放。

循环包装的系统边界确定为: 由循环包装原材料、生产、循环使用、回收的一系列单元过程流组成的集合, 包括原材料生产和运输, 循环包装的生产、运输、回收、盘点、清洗等过程中直接和间接的温室气体排放如图 2 所示。

2.3 生命周期清单分析

2.3.1 原材料

研究选取包装企业 A 某循环箱型作为示例进行箱体数据的测算与收集, 其基本信息: 箱体尺寸为 294 mm×243 mm×240 mm, 质量 0.535 kg, 展开面积为 0.525 m², 印刷面积为 0.034 1 m², 定量为 1.02 kg/m²。循环箱板材利用率约 85%, 1 m² 消耗原材料 1.2 kg, 损耗部分进行粉碎再生。表 1 给出了单位面积输入材料及原料运输数据。

根据数据库资料与文献[11,16-19], 加权平均得到聚丙烯的排放系数为 2.99。聚丙烯再生料来源于废品, 满足 cut-off 规则。

2.3.2 包装生产

该循环箱生产过程中所有的工艺步骤使用能源均为电力。A 企业工厂 2020 年在生产循环包装过程中所耗电量为 1 001 416.653 kW·h。工厂冷却塔中的循环水量为 0.5 m³/h, 循环过程水量损耗率为 10%。参照《浙江省重点行业 VOCs 污染排放源排放量计算方法(1.1 版)》, 塑料板制造工序 VOCs 的排放系数为 0.539 kg/t, 1 m² 循环箱所需 PP 原料用量为 1.2 kg,

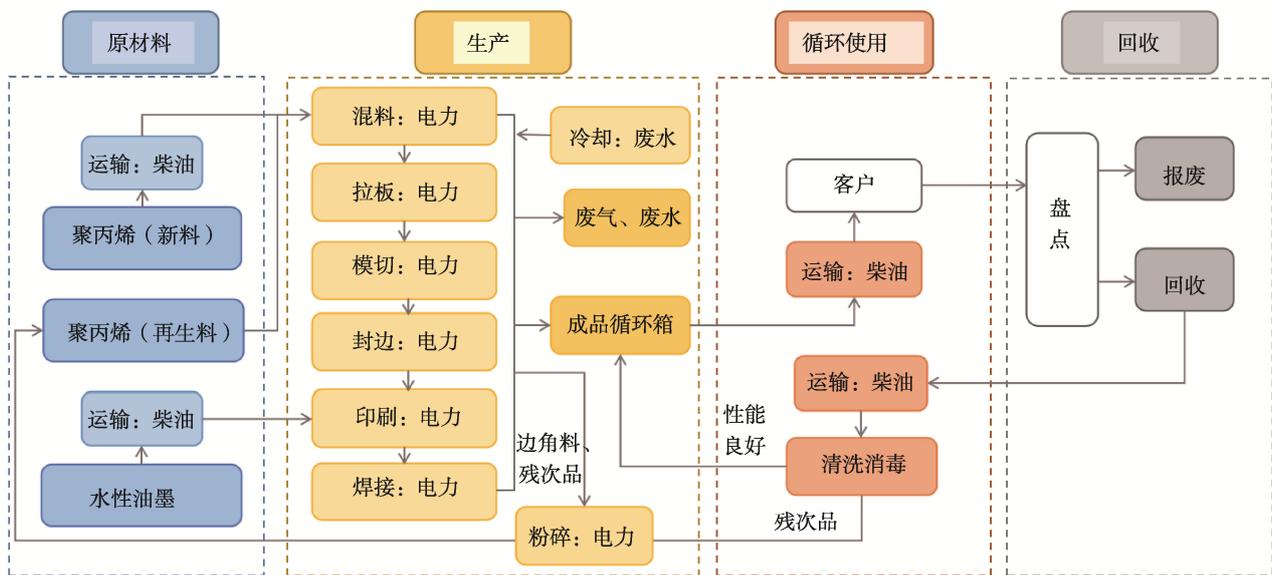


图 2 快递循环包装箱的碳足迹研究系统边界

Fig.2 Carbon footprint study system boundaries of circulating packaging boxes for express

表 1 包装原材料清单
Tab.1 List of packaging raw materials

包装组件	材料	材料质量/kg	运输工具	运输距离/km
箱体	聚丙烯颗粒(新料)	0.8	货车	12
	聚丙烯颗粒(再生料)	0.4		
印刷油墨	水性油墨	6×10 ⁻⁴	货车	18

则单位 VOCs 产生量约为 $0.65 \times 10^{-3} \text{ kg/m}^2$, 废气 VOCs 的碳排放计算默认使用原油的碳排放因子 $74\ 100 \text{ kg/TJ}^{[20]}$ 。印刷工序使用水性油墨与水的体积比为 1:1 进行稀释, 参考《广东省重点行业挥发性有机物 (VOCs) 计算方法 (试行)》计算油墨 VOCs 含量为 $0.39 \times 10^{-3} \text{ kg}$ 。废气在生产与印刷部分进行局部排风收集, 收集率为 40%。采用活性炭吸附方式进行处理, 处理效率为 60%, 可知 VOCs 吸附量为 $0.25 \times 10^{-3} \text{ kg}$, 所需的活性炭用量为 $1 \times 10^{-3} \text{ kg}$, 可知废活性炭约为 $1.25 \times 10^{-3} \text{ kg}$, 由专业单位处理再生。计算过程中忽略了人员因素。

1 m² 聚丙烯包装物生产阶段的输入清单见表 2。生命周期清单的数据来源于企业数据、文献[18,21-22]以及 CLCD 数据库。

2.3.3 循环使用

这一部分主要包括循环箱循环使用过程中的运输、清洗 2 个流程。其中, 清洗过程是为了洗去箱子上的标签, 保证循环箱能顺利投入下次使用。以 A 企业为例, 根据 20 批循环箱的循环运营数据 (调研主要针对上海及周边客户) 分别估算其中 20 个循环包装箱样本运输的里程数 (主要包括工厂、客户以及清洗中心 3 个地点循环使用的运输过程), 样本里程数据如图 3

所示。平均循环总里程数为 34 572.45 km, 平均循环次数为 49 次, 平均清洗次数也按 49 次计算。单位面积清洗过程消耗电力为 $669 \times 10^{-3} \text{ kW}\cdot\text{h}$, 耗水量为 0.15 m^3 。

2.3.4 回收过程

废弃过程的排放主要包括垃圾处理部分。聚丙烯循环箱的材料理论上可通过再生料的方式实现 100% 循环利用, 但由于存在箱体遗失、塑料老化等问题, 存在报废后无法再次回收利用而作废弃处理的情况。本次研究保守估计, 在该流程中每次有 75% 的废弃塑料箱进入回收流程, 经过处理后作为再生材料再次用于生产。除此以外, 因塑料老化等原因报废的塑料箱假设占比为 25%。

此外, 生产阶段产生废活性炭交由专业机构处理再生, 数据难以获取, 因此根据活性炭再生环评报告估算其处理 (热氮气脱附^[22]等) 消耗电力约为 $2.91 \times 10^{-4} \text{ kW}\cdot\text{h}$ 。

3 计算模型与数据核算

3.1 碳排放计算模型

根据确定的生命周期清单过程, 确定各个过程的碳排放计算方式, 各个过程计算式如表 3 所示。循环包装箱总计碳排放量为各过程碳排放量的累加。

表 2 循环包装箱生产阶段数据清单
Tab.2 Data list for production process of circulating packaging

能源	原料				逸散性		危废处理
电力/(kW·h)	聚丙烯颗粒 (新料)质量/kg	聚丙烯颗粒 (再生料)质量/kg	水性油墨 质量/kg	水质量/kg	循环水 质量/kg	VOCs 质量/kg	废活性炭 质量/kg
0.97	0.8	0.4	6×10^{-4}	6×10^{-4}	1.16×10^{-4}	0.79×10^{-3}	1.25×10^{-3}

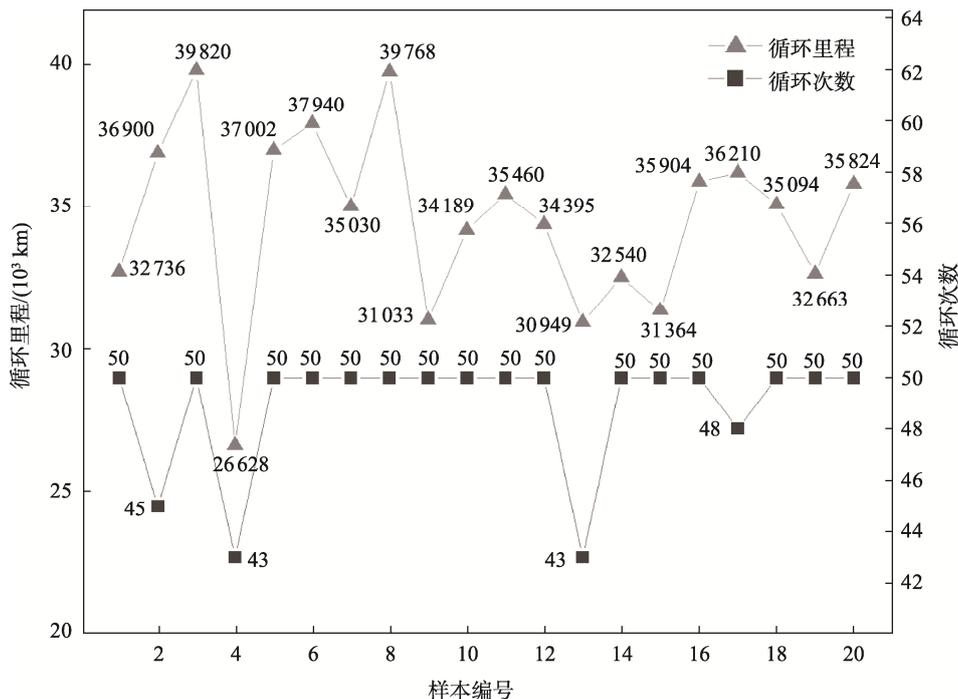


图 3 样本循环次数及里程数
Fig.3 Cycle number and mileage of sample

表 3 循环包装箱碳排放计算模型
Tab.3 Calculation model for carbon emission of circulating packaging boxes

阶段名称	碳排放组成	细分	符号	公式
原材料阶段	包括原材料生产、运输部分	生产	x_1	$x_1 = \sum_{h=1}^n A_h F_h$ (1)
		运输	x_2	$x_2 = \sum_{k=1}^n m_k l_k T_k$ (2)
		电力	x_3	$x_3 = L_1 \times E$ (3)
生产阶段	包含生产过程所用能源部分	能源	x_4	$x_4 = \sum_{h=1}^n A_h F_h$ (4)
		逸散性	x_5	$x_5 = \sum_{h=1}^n A_h F_h$ (5)
循环阶段	包含循环过程中的运输、清洗部分	清洗	x_6	$x_6 = L_2 \times E$ (6)
		废弃物焚烧	x_7	$x_7 = \sum_q (S_q \times d_q \times C_q \times D_q \times O_q)$ (7)
废弃阶段	包含废弃物焚烧过程	辅助化石燃料燃烧	x_8	$x_8 = \sum_{h=1}^n A_h F_h$ (8)
		总计		$X = \sum_{i=1}^n x_i$ (9)

3.2 计算模型分析

3.2.1 原材料生产排放

原材料生产阶段排放可以使用排放因子法进行计算, 以其原材料的数量乘以对应碳排放因子得到:

$$c_m = \sum A_h F_h \quad (10)$$

式中: A_h 为 h 类原材料使用量; F_h 为 h 类原材料对应碳排放因子。

3.2.2 电力排放

根据各区域电网电力排放因子可得, 华东地区碳排放因子为 $0.7035 \text{ kg}/(\text{kW} \cdot \text{h})$ 。碳排放量的计算方式为用电量与其对应碳排放因子的乘积, 公式见式 (11)。

$$C_e = \sum_m L_m \times E \quad (11)$$

式中: C_e 为电力造成碳排放量; L_m 为第 m 次用电量; E 为对应地区电力碳排放因子。

3.2.3 运输过程排放

循环包装各个运输过程的碳排放根据不同运输车辆类型分别计算, 计算式见式 (12)。

$$C_{ys} = \sum_{k=1}^n m_k l_k T_k \quad (12)$$

式中: C_{ys} 为运输阶段碳排放量; m_k 为运输 k 类产品的质量; l_k 为 k 类产品运输道路的道路长度; T_k 为 k 类产品运输车辆的碳排放因子。

本文原材料及成品运输的均使用中型柴油货车 (载质量为 10 t), 其碳排放因子为 $0.162 \text{ kg}/(\text{t} \cdot \text{km})$ 。

3.2.4 废弃过程排放

垃圾焚烧的温室气体排放估算方法参考 IPCC。垃圾自身燃烧产生的 CO_2 排放量见式 (13)。

$$c_f = \sum_q (S_q \times d_q \times C_q \times D_q \times O_q) \times \frac{44}{12} \quad (13)$$

式中: c_f 为垃圾燃烧产生碳排放量; S_q 为焚化或者露天燃烧的固体废物总量; d_q 为 q 组分干质量占比; C_q 为 q 组分干质量含碳量占比; D_q 为 q 组分总碳中化石含碳量占比; O_q 为 q 组分的氧化因子。

3.3 LCA 结果与分析

采用 e-Footprint 软件结合 CLCD 基础数据库进行计算研究。将上述清单分析计算结果特征化, 获得循环包装箱的全球气候变化潜值 (Global Warming Potential, GWP) 这一类环境影响评价结果, 其各个单元过程排放数据如表 4 所示, 数据单元为 1 m^2 。

表4 循环包装箱单元过程碳排放贡献
Tab.4 Cumulative contribution in unit process of circulating packaging boxes

碳足迹主要来源	单位	消耗量	数据收集与说明	排放量/kg	贡献率/%
包装生产			为包装生产阶段排放之和	3.08	31.24
原材料-聚丙烯新料	kg	0.8	排放因子为 2.99	2.39	24.25
原材料-聚丙烯再生料	kg	0.4	原材料来源于废品处理, 满足 cut-off 规则	—	—
原材料-水性油墨	kg	6×10^{-4}	排放因子为 2.8	1.25×10^{-3}	0.01
原材料-水	kg	6×10^{-4}	排放因子为 4.5×10^{-4}	2.7×10^{-4}	0
聚丙烯-货车运输	km	12	默认由 10 t 柴油货车运输, 排放因子为 0.162 kg/(t·km)	1.56×10^{-3}	0.02
印刷油墨-货车运输	km	18	默认由 10 t 柴油货车运输, 排放因子为 0.162 kg/(t·km)	1.75×10^{-3}	0.02
生产-电力	kW·h	0.97	排放因子为 0.703 5 kg/(kW·h)	0.683 1	6.93
冷却-循环水	m ³	1.16×10^{-4}	排放因子为 3×10^{-4}	3.48×10^{-5}	0
生产-VOCs	kg	0.65×10^{-3}	排放因子为 74 100 kg/TJ	2.52×10^{-3}	0.03
包装使用	—	—	为包装使用阶段排放之和	6.228 9	63.41
循环-货车运输	km	34572.45	默认由 10 t 柴油货车运输, 排放因子为 0.162 kg/(t·km)	5.71	57.95
清洗-水	m ³	0.15	排放因子为 4.5×10^{-4}	6.75×10^{-2}	0.68
清洗-电力	kW·h	669×10^{-3}	排放因子为 0.703 5 kg/(kW·h)	0.470 6	4.78
包装回收	—	—	为包装回收阶段排放之和	0.525 3	5.33
报废-垃圾处理	kg	0.255	默认为焚烧处理, 排放因子为 2.06	0.525 3	5.33
废活性炭处理-电力	kW·h	2.91×10^{-4}	排放因子为 0.703 5 kg/(kW·h)	2.05×10^{-4}	0
总计				9.854 1	100

注: 碳排放因子数据来自 CLCD 数据库、标准^[23]、文献^[24-25]及环评报告。

综上可知, 1 m²循环包装箱碳排放量为 9.854 1 kg, 单次排放小于五层瓦楞纸箱^[6,26]。其主要碳排放贡献来源于循环运输与原材料聚丙烯。循环使用过程中, 货车运输占总排放的 57.95%, 原材料聚丙烯占总排放的 24.25%, 工厂电力排放(包括生产、清洗阶段)占总排放的 11.71%, 垃圾焚烧处理过程排放占总排放的 5.33%。

4 结语

在全生命周期的计算条件下, 循环包装箱循环使用近 50 次全生命周期排放量约为 9.854 1 kg/m², 单次排放约为 0.201 kg/m², 结果远远小于同单位使用一次五层瓦楞纸纸箱的排放。说明在本文假设前提下循环包装的环保效益较高。

对于循环包装箱的碳足迹, 贡献从大到小依次为运输、原材料、电力和垃圾处理。针对这几点, 对循环包装箱提出减排建议: 原材料为聚丙烯, 基于循环的特点很难改进原材料, 但对于箱体可以尽量减

少色母、油墨等材料的使用, 这样不仅能提高回收率, 也使得回收利用的再生料性能更佳, 可在一定程度上提高生产过程中再生料比例, 从而降低聚丙烯新料用量, 达到减排的效果; 在生产、清洗等过程中控制电力使用, 尽量节约用电, 从而达到减排的目的; 对于运输过程, 使用新能源物流车进行运输或可减少排放。

参考文献:

- [1] 中华人民共和国国家邮政局. 国家邮政局公布 2020 年邮政行业运行情况[EB/OL]. 北京: 国家邮政局, (2021-01-14). [2021-01-14]. <https://www.spb.gov.cn/gjyzj/c100015/c100016/202101/2ef764639616407d82cb a2aa6f4ae74d.shtml>.
- [2] SAZDOVSKI I, BALA A, FULLANA-I-PALMER P. Linking LCA Literature with Circular Economy Value Creation: A Review on Beverage Packaging[J]. The Science of the Total Environment, 2021, 771: 145322.

- [3] RICCARDO A, ALESSANDRO C, SUSAN C, et al. Economic and Environmental Assessment of Reusable Plastic Containers: A Food Catering Supply Chain Case Study[J]. *International Journal of Production Economics*, 2014, 152: 88-101.
- [4] JAN P, MARKÉTA Š, VLADIMIR K. Carbon Footprint Assessment of Construction Waste Packaging Using the Package-to-Product Indicator[J]. *Sustainability*, 2020, 12(23): 10094.
- [5] KRAUTER V, BAUER A S, MILOUSI M, et al. Cereal and Confectionary Packaging: Assessment of Sustainability and Environmental Impact with a Special Focus on Greenhouse Gas Emissions[J]. *Foods*, 2022, 11(9): 1347.
- [6] 年鹤, 王晓敏. 瓦楞纸箱生产碳足迹的计算方法与实例分析[J]. *包装工程*, 2012, 33(5): 86-89.
NIAN He, WANG Xiao-min. Calculation Method and Case Analysis of Carbon Footprint in Corrugated Carton Production[J]. *Packaging Engineering*, 2012, 33(5): 86-89.
- [7] 耿会君, 赵方方. 基于碳足迹的快递包装箱循环利用的策略研究[J]. *天津科技*, 2020, 47(2): 74-76.
GENG Hui-jun, ZHAO Fang-fang. Study on Strategy of Express Packing Box Recycling Based on Carbon Footprint[J]. *Tianjin Science & Technology*, 2020, 47(2): 74-76.
- [8] 王志慧, 王洪涛, 黄娜, 等. 纸塑铝复合包装材料的碳足迹评价与认证[J]. *环境科学研究*, 2012, 25(6): 712-716.
WANG Zhi-hui, WANG Hong-tao, HUANG Na, et al. Carbon Footprint Assessment and Certification of Al-PE-Pa Complex Package[J]. *Research of Environmental Sciences*, 2012, 25(6): 712-716.
- [9] 潘生林, 封亚辉, 查燕青, 等. 跨境再生 HDPE 生产塑料罐包装的碳足迹评价研究[J]. *包装工程*, 2021, 42(23): 1-7.
PAN Sheng-lin, FENG Ya-hui, ZHA Yan-qing, et al. Carbon Footprint Assessment of Plastic can Packaging Produced by Cross-Border Recycled HDPE[J]. *Packaging Engineering*, 2021, 42(23): 1-7.
- [10] 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.
ZHAO Yu, HUO Li-jiang. Life Cycle Assessment of Sales Packaging Cartons for Cosmetics[J]. *Packaging Engineering*, 2020, 41(21): 131-137.
- [11] 巩桂芬, 李想. 两款木包装箱的生命周期影响分析及对比[J]. *包装工程*, 2021, 42(5): 134-141.
GONG Gui-fen, LI Xiang. Impact Analysis and Comparison of Two Wooden Packaging Boxes during Life Cycle[J]. *Packaging Engineering*, 2021, 42(5): 134-141.
- [12] 孙丹妮, 霍李江, 赵昱. 书籍快递包装袋生产工艺的生命周期评价[J]. *数字印刷*, 2021(6): 51-56.
SUN Dan-ni, HUO Li-jiang, ZHAO Yu. Life Cycle Assessment of Production Technology for Book Express Packages[J]. *Digital Printing*, 2021(6): 51-56.
- [13] ROBERTSON K, GARNHAM M, SYMES W. Life Cycle Carbon Footprint of the Packaging and Transport of New Zealand Kiwifruit[J]. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 2014, 19(10): 1693-1704.
- [14] DIOGO A L S, GECE W S R, GUSTAVO S, et al. Comparison of Disposable and Returnable Packaging: a Case Study of Reverse Logistics in Brazil[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2013, 47.
- [15] ZHAO Rui, XU Yao, WEN Xiang-yu, et al. Carbon Footprint Assessment for a Local Branded Pure Milk Product: a Lifecycle Based Approach[J]. *Food Science and Technology (Campinas)*, 2018, 38(1): 98-105.
- [16] 张楚珂, 田涛, 王之茵, 等. 聚丙烯产品碳足迹核算及对比研究[J]. *石油石化绿色低碳*, 2021, 6(6): 17-23.
ZHANG Chu-ke, TIAN Tao, WANG Zhi-yin, et al. The Study of Carbon Footprint Calculation and Comparison of Polypropylene Product[J]. *Energy Conservation and Emission Reduction in Petroleum and Petrochemical Industry*, 2021, 6(6): 17-23.
- [17] 田涛, 朱明璋, 姜晔. 石化产品碳足迹评价研究与实践[J]. *油气与新能源*, 2022(5): 100-108.
TIAN Tao, ZHU Ming-zhang, JIANG Ye. Evaluation Research and Practice of the Petrochemical Product Carbon Footprint[J]. *Petroleum and New Energy*, 2022(5): 100-108.
- [18] 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): 233-237.
LI De-xiang, YE Lei, ZHI Zhao-hui, et al. Life Cycle Assessment of Three Typical Disposable Plastic Takeout Boxes[J]. *Modern Food Science & Technology*, 2022, 38(1): 233-237.
- [19] 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): 1-9.
LI Quan-xin, LI Jun-jie, GONG Xian-zheng, et al. Life Cycle Assessment of Coal to Polypropylene Based on

- Two Different Routes[J]. *Coal Conversion*, 2022, 45(4): 1-9.
- [20] 许浩, 徐夏凡, 陈六彪, 等. 基于液氮冷凝的 VOCs 深冷回收技术研究[J]. *油气田环境保护*, 2022, 32(6): 13-18.
- XU Hao, XU Xia-fan, CHEN Liu-biao, et al. Research on Cryogenic Recovery of VOCs Technology Based on Liquid Nitrogen Condensation[J]. *Environmental Protection of Oil & Gas Fields*, 2022, 32(6): 13-18.
- [21] 朱永双, 王利婕, 刘霞. 商业宣传册印刷品碳足迹计算方法[J]. *包装工程*, 2016, 37(9): 165-170.
- ZHU Yong-shuang, WANG Li-jie, LIU. Methodology Analysis on Carbon Footprint Calculation for Commercial Brochures[J]. *Packaging Engineering*, 2016, 37(9): 165-170.
- [22] 贾册, 谭效时, 关攀博, 等. 船舶工业 VOCs 管控治理现状及对策分析[J/OL]. *安全与环境学报*:1-14[2023-03-18]. <https://doi.org/10.13637/j.issn.1009-6094.2022.2008>.
- JIA Ce, TAN Xiao-shi, GUAN Pan-bo, et al. VOCs Emissions from Shipbuilding industry of China: Emission, Management and Policy[J/OL]. *Journal of Safety and Environment*: 1-14[2023-03-18]. <https://doi.org/10.13637/j.issn.1009-6094.2022.2008>.
- [23] EGGLESTON H S, BUENDIA L, MIWA K, et al. IPCC guidelines for national greenhouse gas inventories. Volume 2: Energy Chapter 2: Stationary Combustion[R]. IGES, 2006.
- [24] 杜永鑫. 芳烃生产过程碳足迹核算及评价研究[D]. 北京: 中国石油大学, 2021: 29-30.
- DU Yong-xin, Accounting and Evaluation of Carbon Footprint in AromaticHydrocarbons Production Process[D]. Beijing: China University of Petroleum, 2021: 29-30.
- [25] 黄静颖, 张浩, 谭钦怀, 等. 小型垃圾热解气化焚烧厂碳排放计算[J]. *环境卫生工程*, 2021, 29(4): 1-6.
- HUANG Jing-ying, ZHANG Hao, TAN Qin-huai, et al. Calculation of Carbon Emissions of a Small Scale Waste Pyrolysis-Gasification Incineration Plant[J]. *Environmental Sanitation Engineering*, 2021, 29(4): 1-6.
- [26] 任宪姝, 霍李江. 瓦楞纸箱生产工艺生命周期评价案例研究[J]. *包装工程*, 2010, 31(5): 54-57.
- REN Xian-shu, HUO Li-jiang. Case Study of Life Cycle Assessment for Corrugated Board Box Production Technology[J]. *Packaging Engineering*, 2010, 31(5): 54-57.

责任编辑: 曾钰婵