

定制猫眼彩盒的生命周期评价分析

林铭香, 林勤保, 马仕成, 马志恒, 黄玮彬
(暨南大学 包装工程研究所, 广东 珠海 519070)

摘要: **目的** 研究定制猫眼彩盒的生产对环境的影响, 为此类型包装材料对环境的影响评估以及生产工艺改进提供参考。**方法** 采用生命周期评价(LCA)方法定性、定量分析其对环境(9个环境因素)的影响, 在e-Footprint软件上, 在线完成全部生命周期评价, 包括建模、计算分析、数据质量评估和LCA结果发布。**结果** 该类产品对初级能源消耗、水资源消耗和气候变化的影响较大。每个彩盒消耗0.71 MJ初级能源和0.35 kg水, 排放0.05 kg影响气候变化的气体。其中, 白卡纸和定制猫眼膜的初级能源消耗占比分别为37%和35%, 水资源消耗的79%来自白卡纸生产, 影响气候变化气体的排放占比分别为29%和25%。**结论** 通过优化白卡纸和定制猫眼膜材料、结构以及生产工艺流程, 可降低定制猫眼彩盒的能源消耗(含初级能源和水资源), 减少温室效应气体的排放。

关键词: 定制猫眼彩盒; 生命周期评价; 环境影响

中图分类号: TB484.1 文献标识码: A 文章编号: 1001-3563(2020)21-0125-06

DOI: 10.19554/j.cnki.1001-3563.2020.21.017

Life Cycle Assessment on Customized Cat Eye Carton

LIN Ming-xiang, LIN Qin-bao, MA Shi-cheng, MA Zhi-heng, HUANG Wei-bin

(Packaging Engineering Institute, Jinan University, Zhuhai 519070, China)

ABSTRACT: The work aims to study the environmental impact of customized cat eye carton production, and to provide a reference for environmental impact assessment and process improvement of this type of packaging materials. The life cycle assessment (LCA) method was used to qualitatively and quantitatively analyze its impact on the environment (including 9 environmental factors). On the e-Footprint software, all life cycle assessments were completed online, including modeling, calculation analysis, data quality assessment and LCA results release. This type of product had a greater impact on primary energy consumption, water consumption and climate change. Each carton consumed 0.71 MJ of primary energy and 0.35 kg of water, and emitted 0.05 kg of gases that affected climate change. Among them, white cardboard and customized cat eye masks accounted for 37% and 35% of primary energy consumption, 79% of water consumption came from white cardboard production, and 29% and 25% of emissions to climate change gases, respectively. By optimizing the material, structure and production process of white cardboard and customized cat eye film, the energy consumption (including primary energy and water resources) of customized cat eye carton can be reduced and greenhouse gas emissions can be reduced.

KEY WORDS: customized cat eye carton; life cycle assessment (LCA); environmental impact

收稿日期: 2020-03-21

作者简介: 林铭香(1982—), 女, 暨南大学在职研究生, 主攻口腔护理产品的包装材料和包装设计。

通信作者: 林勤保(1968—), 男, 博士, 暨南大学研究员, 主要研究方向为食品包装安全。

定制猫眼彩盒是为产品量身定制的具有炫目货架展示效果的包装材料,非常吸引消费者眼球,目前广泛应用于烟酒、快消品、化妆品以及洗涤用品的包装,是当前高端产品的主流包装材料之一。工信部“十三五”规划以促进全产业链和产品全生命周期绿色发展为目的,结合外部环境政策以及包装发展趋势,确定以定制猫眼彩盒为研究对象,通过生命周期评价(LCA)工具,评估此类包装材料在整个生命周期过程中对环境的影响。

生命周期评价是汇总和评价一个产品体系在其整个生命周期中所有的投入及产出对环境造成的影响以及潜在影响的评价方法,也是国际上普遍认可的、有效的环境管理工具^[1]。目前,进行生命周期评价研究的包装材料主要有秸秆造纸^[2]、白纸板^[3]、典型纸^[4]、瓦楞纸箱^[5]、林浆纸一体化生产的白卡纸^[6]、印刷书写纸^[7-8]等,销售包装有罐装薯片包装^[9]、烟包产品的折叠纸盒^[10]、化妆品包装^[11]、月饼包装^[12],对定制猫眼彩盒的生命周期评价还未见报道。

1 生命周期评价的主要内容

由 GB/T 24040—2008^[13]可知,生命周期评价主要包括 4 个部分,分别为目标与范围的确定、清单分析、生命周期影响评价和数据质量评估结果。

1.1 目标与范围确定

定制猫眼彩盒,顾名思义,“定制”和“猫眼”是该类型彩盒的 2 个基本属性。“定制”是基于产品设计和货架展示效果,量身定制且具有特定图案的产品。“猫眼”是对凸透镜效果的一个比较形象的描述。虽然“猫眼”像是一个立体的凸透镜,具有 3D 景深效果,但用手触摸猫眼透镜部位,没有任何的凸起感。猫眼定制膜利用菲涅尔透镜制作原理加载激光雕刻,运用 UV 模压技术在低温下将图案完美的压印到 PET 薄膜上。该生产工艺能极好地控制材料变形,为精细印刷加工提供保证。

文中以插入式结构的定制猫眼彩盒为研究对象,成型后的尺寸为 55 mm×38 mm×185 mm(长×宽×高),有多个大大小小的猫眼以及铂金浮雕、涟漪铂金水波纹和拉斯纹等多种设计图案。盒子材料为 400 g 的白卡纸,纸上复有定制猫眼膜。在定制猫眼膜上涂一层用于加强油墨附着力的清漆,然后通过胶

版印刷既定图案,连线涂布 UV 光油以保护油墨,防止刮花、掉墨,同时确保印刷后盒子表面的摩擦力控制在较低水平。研究产品的生产流程为定制猫眼膜的生产、白卡纸生产、定制猫眼膜和白卡纸的复合、卷装复合纸分切成平张复合纸、印刷、模切成特定尺寸和结构的单个盒子,最终粘盒成型,共 7 个步骤,生产流程见图 1。

基于定制猫眼彩盒的生产流程,确定研究产品的系统边界。从白卡纸、定制猫眼膜的输入到白卡纸与定制猫眼膜复合,卷装复合纸分切成平张纸、彩色印刷、模切成盒胚到粘好成盒子的输出。生产过程中的边角余料,如纸浆、纸张、膜等均交给有资质的第三方回收利用,不考虑生产余料的直接回收使用。整个产品的生产过程发生在同一个城市,运输路程较短,因此,暂不考虑物料中转过程中消耗的汽油、柴油以及厂内半成品搬运和存储过程中消耗的电。整个生产过程中不考虑设备的折旧或折损,厂房、生活设施以及照明等。产品系统边界的确定见图 2。

文中采用亿科 e-Footprint 软件,原材料对资源环境的影响数据均来自 CLCD 0.8, ELCA 3.0.0, Ecoinvent 等基础数据库。根据 CLCD 的取舍原则,只要生产中消耗的原料质量小于的过程产出质量的 1%,高稀或高纯成分的物料质量小于过程产出质量的 0.1%,可以忽略这些物料,且所有忽略物料的总质量不超过物料总质量的 5%。经确认,生产中使用的物料(如镍板、润版液、乙醇、乙酸正丙酯、UV 洗车水、CTP 版以及 CTP 显影液等)质量符合 CLCD 的取舍原则,因此,此研究中暂不考虑上述物料对生命周期评价的影响。

根据生命周期软件评价结果,文中将从资源消耗(如初级能源消耗(PED))、非生物资源消耗潜值(ADP)、水资源消耗(WU)和各种环境影响指标(如气候变化(GWP)、臭氧层消耗(ODP)、酸化(AP)、光化学臭氧合成(POFP)、富营养化潜值(EP)以及生态毒性(ET))出发,得到环境影响评价指标,从而评价产品在生命周期过程中对资源和环境的潜在影响程度。

1.2 清单分析

生命周期清单分析是指收集调查单位目标产品生命周期各阶段中的资源消耗、原材料与二次消耗和废气、废水、废物排放等输入和输出数据,从而系统、

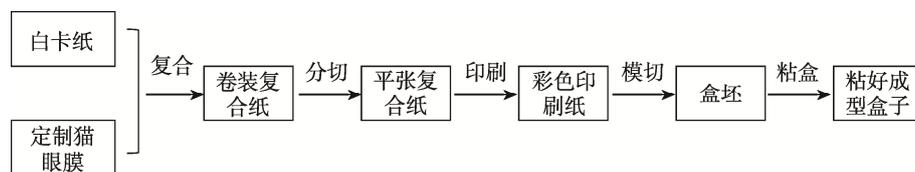


图 1 定制猫眼彩盒的生产流程
Fig.1 Workflow of customized cat eye carton

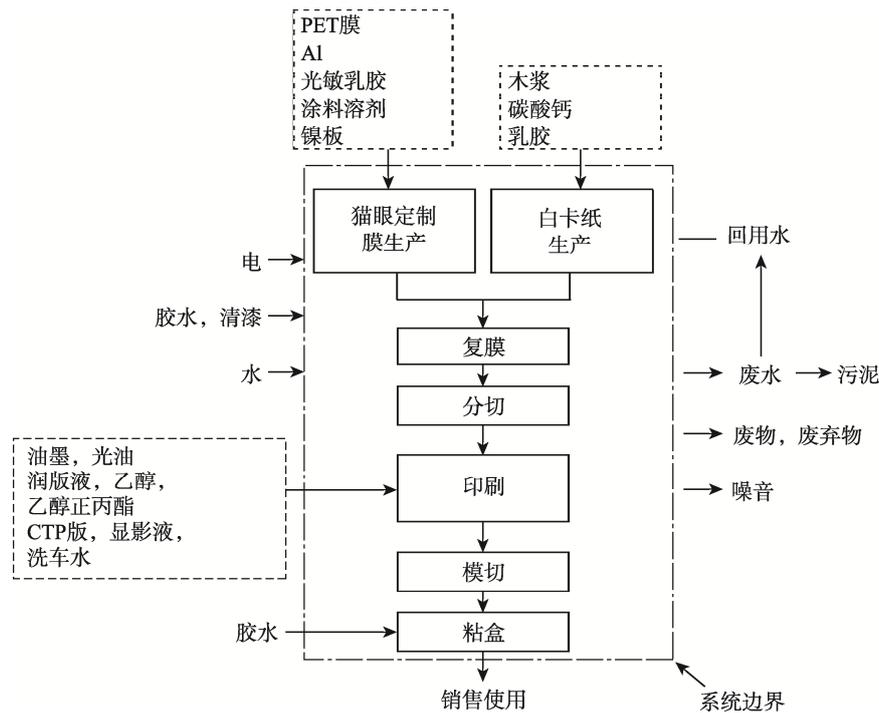


图 2 产品系统边界
Fig.2 Product system boundary

量化地描述产品在生命周期过程中造成的各种资源环境影响^[14]。纸浆、胶料、碳酸钙、PET 膜、清漆、铝、油墨、光油等基础物料对资源环境的影响值从 LCA 基础数据库（如中国生命周期核心数据库 CLCD、国外数据库 Ecoinvent）中获取，生产过程中的电以及制作成半成品时的上游物料消耗量是企业生产过程中的真实数据。

基于 50 万个盒子的实际生产情况，定制猫眼彩盒生产数据的基本信息见表 1，在研究的系统边界内，产品生产过程的物耗和能耗的数据清单见表 2，所有的数据都来自广东企业及供应链 2018 年的实际生产数据。

1.3 生命周期影响评价

生命周期评价基于生命周期清单结果，并合并同类资源消耗（如不可再生资源消耗、初级能源消耗、水资源消耗等）和各种类型的环境影响（如全球变暖、臭氧层消耗、酸化、光化学臭氧合成、富营养化潜值和生态毒性等），得出相应环境影响类型的评价指标和对某类环境的潜在影响程度^[15]。在 e-Footprint 软件上建模计算得到单个彩盒对能耗和环境的影响贡献值，见表 3。

根据生命周期评价结果，定制猫眼彩盒的能耗主要为初级能源消耗和水资源消耗，对环境的影响主要

表 1 定制猫眼彩盒的生产数据基本信息
Tab.1 Basic production data of customized cat eye carton

过程名称	过程边界	主要原料	工艺设备	主要能源
定制猫眼膜	从 PET 膜，乳胶，铝等输入到定制猫眼膜生产	PET 膜，乳胶	激光雕刻机、模压机、真空镀铝机	电
单粉纸	从木浆、碳酸钙、胶料等输入到纸张生产	纸浆、碳酸钙、胶料	造纸机	水、电
卷装定制猫眼纸	从定制猫眼膜、纸张、胶水、清漆等输入到定制猫眼纸张的生产	定制猫眼膜、纸张、胶水、清漆	复膜机	水、电
平张定制猫眼纸	从卷装定制猫眼纸输入到平张定制猫眼纸张的生产	卷装定制猫眼纸	模切机	电
定制猫眼纸印刷	从空白定制猫眼纸、油墨、光油等输入到彩色印刷纸	定制猫眼纸、油墨、光油	UV 印刷机	水、电
模切	从印刷好的平张纸输入到单个彩盒	印刷好的平张纸	模切机	电
粘盒	从单个彩盒输入到粘好的彩盒	单个彩盒、胶水	粘盒机	电

表2 彩盒生产加工过程输入数据清单
Tab.2 Input data of carton production process

原料	用量
木浆(进口)	11 136 kg
碳酸钙	1920 kg
胶料	384 kg
光敏乳胶	255 kg
胶水	521 kg
PET膜	835 kg
铝	6.4 kg
油墨	47 kg
UV光油	144 kg
清漆	26.5 kg
水	115 610 kg
电	18 145 kW·h

表3 单个包装彩盒对环境的影响指标
Tab.3 EIA index of single carton

环境影响类型 指标	指标评估的物质清单	每个定制猫眼 彩盒 LCA 结果
初级能源消耗	原油, 原煤, 天然气等 一次性化石能源	705 kJ
非生物资源消耗 潜值	Fe, Mn, V, Ti, Cu, Au 等归整为 Sb	131 μg
水资源消耗	淡水、地表水、 地下水等	350 g
气候变化	CO ₂ , CH ₄ , N ₂ O, SF ₆ , HFCs 等归整为 CO ₂	48.3 g
臭氧层消耗	CCl ₄ , CF ₂ BrCl, C ₂ H ₃ Cl ₃ , CF ₃ Br 等归整 为 CFC-11	0.59 μg
酸化	SO ₂ , NO _x , NH ₃ , HF, H ₂ S 等归整为 SO ₂	255 mg
光化学臭氧合成	C ₂ H ₆ , C ₂ H ₄ , C ₆ H ₂ 等	54.8 mg
富营养化潜值	NH ₃ , NH ₄ ⁺ , NO, NO ₂ , NH ₄ -N 等归整为 PO ₄ ³⁻	32.1 mg
生态毒性(CTUe)	CR ⁶⁺ , Ba, Co, Hg ²⁺ , Be 等	1.56×10 ⁻³

是气候变化。对非生物资源消耗潜值、臭氧层消耗、酸化、光化学臭氧合成、富营养化潜值以及生态毒性影响稍小。文中重点分析了初级能源消耗、水资源消耗和气候变化,对环境的影响较小的指标暂不展开讨论。

基于生命周期的评价结果分析定制猫眼彩盒生产过程中的累积贡献,确定了7个生产单元的累积贡献值,见表4,初级能源消耗、水资源消耗和气候变化的累积贡献分别见图3—5。

表4 定制猫眼彩盒的累积贡献值
Tab.4 Cumulative contribution of customized cat eye carton

环境指标	单粉纸	定制猫眼膜	复膜	分切	印刷	模切	粘盒
PED	36.9	35.2	10.5	10.8	3.7	0.5	2.4
WU	78.7	6.2	5.7	5.7	2.2	0.2	1.3
GWP	29.2	24.6	12.9	11.2	8.9	0.5	12.7

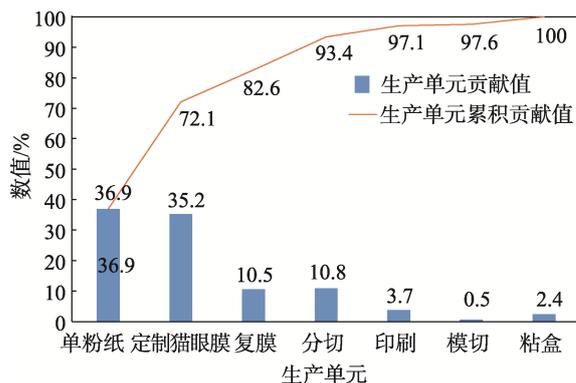


图3 定制猫眼彩盒的初级能源消耗累积贡献值
Fig.3 Cumulative contribution of customized cat eye carton to PED

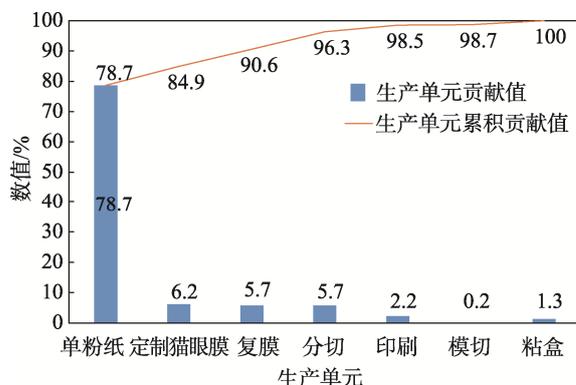


图4 定制猫眼彩盒的水资源消耗累积贡献值
Fig.4 Cumulative contribution of customized cat eye carton to WU

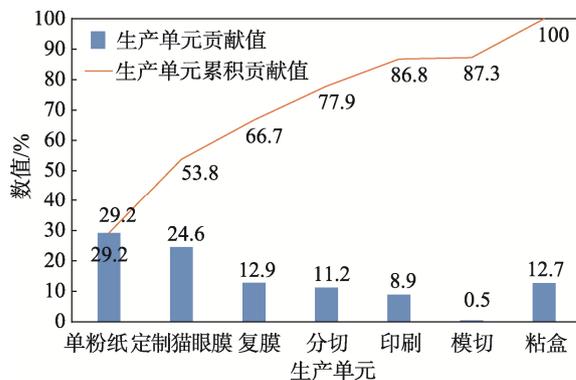


图5 定制猫眼彩盒的气候变化累积贡献值
Fig.5 Cumulative contribution of customized cat eye carton to GWP

从图 3—5 可以看出,定制猫眼彩盒的初级能源消耗中,单粉纸生产占 37%,定制猫眼膜生产占 35%,复膜和分切分别占 10%,印刷、模切和粘盒共占 5%。水资源消耗主要集中在单粉纸生产(约占 79%),定制猫眼膜生产、复膜、分切、印刷以及粘盒约占 21%。在影响气候变化(GWP)的气体排放方面,单粉纸占 29%,定制猫眼膜占 25%,复膜、分切、印刷以及粘盒各占 10%。单粉纸和定制猫眼膜生产过程中的初级能源消耗和影响气候变化的气体排放最多,其次是复膜、分切、印刷、粘盒,最后是模切。水资源消耗主要集中在白卡纸的生产过程中。

1.4 数据质量评估结果

报告采用 CLCD 质量评估方法,使用 e-Footprint 软件对定制猫眼彩盒生产过程的 LCA 模型清单数据进行不确定评估,基于研究对象行业实际生产数据,得到了单个彩盒的数据质量评估结果,见表 5。

从表 5 可以看出,定制猫眼彩盒的结果不确定度中除水资源消耗高达 39%外,其余的均在 12%~19%之间,属于正常范围。水资源消耗不确定度较高的原因主要是由白卡纸生产中的废水排放指标、废水处理效果以及引用数据年份等因素引起的,需要进一步剖析,可降低结果不确定度。

2 工艺改进建议

文中根据定制猫眼膜彩盒的生命周期评价结果,并结合生产工艺过程进行了分析,建议着重从以下 6 个方面出发降低初级能源和水资源消耗,减少影响气候变化的气体排放。

1) 定制猫眼膜对环境的污染比纸张严重,且带有膜的包装彩盒的回收过程更复杂和困难。包装的处理方式对环境的影响由大到小依次为填满、焚烧、再生。

“去膜化”包装会对改善环境将起到立竿见影的效果。

2) 优化包装材料,如使用定量较低的纸张,用浅浮雕定制膜代替定制猫眼膜;优化产品尺寸,采用更紧凑的包装尺寸;优化产品结构,调整后盒子的尺寸不变,正面与一侧面的相交位比原来下移 9~10 mm,这样可减少纸张的使用同时不影响产品的货架展示效果。“减量化”包装,即减少纸张和定制膜的使用,降低对环境的影响。

3) 增加造纸中游离水的含量,使纸纤维中的微纤维与游离水中的氢键结合,从而提高纸张层间强度;同时,更多纤维与氢键结合,使纸张更蓬松。由于微纤维的结合强度提高,因此在同等定量下,更厚纸张的挺度更高。一般情况下,285 g 的高松厚白卡纸的物理性能媲美 350 g 或 400 g 的白卡纸。使用多用高松厚白卡纸代替普通白卡纸,可减少纸张纤维的用量,从而减少树木的砍伐与二氧化碳的排放。

4) 分析 LCA 结果可知,定制猫眼膜的用量虽少,但对温室效应的影响与纸张持平。在追求包装品质的同时,增加文件设计的容忍度,即粗定位的定制膜代替精细定制膜,使用更薄的 PET 膜和 UV 涂层。使用 PET 膜可转移工艺,在定制猫眼膜和纸张复合后,PET 基膜可以从复合的纸张上剥离,从而实现彩盒去膜化,便于盒子的回收利用,减少微塑料以及纳米塑料对环境的污染。同时,经转移法剥离的 PET 膜变形较小,可以回收再次使用。

5) 生产过程中消耗的电,主要来自煤炭和天然气的燃烧。煤炭和天然气燃烧后排放的 SO_x , NO_x , CO , CO_2 以及烟尘对初级能源消耗、气候变化以及酸化的影响较大。自动化控制技术被广泛应用于绿色电力企业的生产,能耗高的设备逐渐被节能、绿色设备代替;引入太阳能、水能、天然气、露天光伏系统等更环保的发电形式,可减少煤炭的燃烧,降低对环境的影响。

表 5 单个定制猫眼彩盒数据质量评估
Tab.5 Data quality evaluation on single customized cat eye carton

指标名称	LCA 结果	结果不确定度/%	置信区间(95%)
初级能源消耗	705 kJ	14.00	[607, 804] kJ
非生物资源消耗潜值	131 μ g	12.87	[114, 148] μ g
水资源消耗	350 g	38.82	[214, 486] g
气候变化	48.3 g	15.37	[40.9, 55.7] g
臭氧层消耗	0.59 μ g	18.50	[0.481, 0.70] μ g
酸化	255 mg	12.08	[224, 286] mg
光化学臭氧合成	54.8 mg	13.88	[47.2, 62.5] mg
富营养化潜值	32.1 mg	12.82	[28, 36.2] mg
生态毒性(CTUe)	1.56×10^{-3}	13.08	$[1.36 \times 10^{-3}, 1.76 \times 10^{-3}]$

注: CTUe 是 Comparative toxic unit for aquatic ecotoxicity impact 缩写

6) 对造纸污水进行处理, 提高化学药品的使用效率有助于减少造纸行业水足迹, 优化淡水资源的利用。

“减量化、去膜化、设计简约化”是当今快消品包装的研究主题。品牌商可以呼吁和引导消费者为更环保更绿色更简单的包装买单。

3 结语

基于生命周期评价方法对定制猫眼彩盒的生产工艺进行了环境影响分析, 适通过对过程累积贡献的分析, 有效识别了定制猫眼彩盒对资源环境的影响, 主要来自白卡纸和定制猫眼膜的生产单元, 为纸张和膜对资源、环境的影响研究以及工艺改进提供参考。文中用全生命周期思想对定制猫眼彩盒生产过程进行了研究, 涵盖全面的生产工艺流程, 生产过程中的数据均来自企业, 生产工艺水平在行业平均水平以上, 且生命周期评价结果的不确定性控制在一个合理的范围, 因此, 数据结果具有较好的实际应用价值。数据结果中缺少产品包装废弃物处理方式对环境的影响, 在今后的研究中需要持续改进。

参考文献:

- [1] 罗根华, 周晓霞. 塑料和铝质咖啡机的生命周期评价[J]. 辽宁工程技术大学学报(自然科学版), 2009, 28(S2): 199—201.
LUO Gen-hua, ZHOU Xiao-xia. Life Cycle Assessment of Plastics and Aluminum Coffee Machines[J]. Journal of Liaoning Technical University (Natural Science Edition), 2009, 28(S2): 199—201.
- [2] 周婷. 基于生命周期评价的秸秆造纸环境影响研究[D]. 南京: 南京农业大学, 2013: 49—54.
ZHOU Ting. Environment Impact Research of Straw-paper Making Based on Life Cycle Assessment[D]. Nanjing: Nanjing Agricultural University, 2013: 49—54.
- [3] 赵会芳. 浙江省白纸板造纸业的生命周期评价[D]. 杭州: 浙江大学, 2004: 25—31.
ZHAO Hui-fang. Life Cycle Assessment on Zhejiang White Paperboard Industry[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2004: 25—31.
- [4] 任丽娟. 生命周期评价方法及典型纸产品的生命周期评价研究[D]. 北京: 北京工业大学, 2011: 27—32.
REN Li-juan. Methodology Research and Typical Paper Products of Life Cycle[D]. Beijing: Beijing University of Technology, 2011: 27—32.
- [5] 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.
- [6] 张美玲. 林浆纸一体化生命周期评价[D]. 哈尔滨: 东北农业大学, 2011: 25—30.
ZHANG Mei-ling. Life Cycle Assessment of Forestry (Pulp) and Paper-making Industry[D]. Harbin: Northeast Agricultural University, 2011: 25—30.
- [7] 马倩倩. 用生命周期评价印刷书写纸的环境行为[J]. 造纸与生物质材料, 2011, 30(3): 4—8.
MA Qian-qian. Evaluation of the Environmental Performance of Printing and Writing Paper Using Life Cycle Assessment[J]. World Pulp and Paper, 2011, 30(3): 4—8.
- [8] MANDA B M K, BLOK K, PATEL M K. Innovations in Papermaking: an LVA of Printing and Writing Paper from Conventional and High Yield Pulp[J]. Science of the Total Environment, 2012, 439: 307—320.
- [9] 谢勇, 王凯丽, 谭海湖. 罐装薯片包装的生命周期评价[J]. 包装学报, 2015, 7(4): 1—6.
XIE Yong, WANG Kai-li, TAN Hai-hu. LCA of Canned Potato Chip Packaging[J]. Packaging Journal, 2015, 7(4): 1—6.
- [10] 李梦婷. 折叠纸盒的生命周期评价研究[D]. 北京: 北京印刷学院, 2019: 4—5.
LI Meng-ting. Study on the life Cycle Assessment of Folding Carton[D]. Beijing: Beijing Institute of Graphic Communication, 2019: 4—5.
- [11] CIVANCIK-USLUD, PUIG R, VOIGT S, et al. Improving the Production Chain with LCA and Eco-design: Application to Cosmetic Packaging[J]. Resources, Conservation and Recycling, 2019: 151.
- [12] 郎芳, 马晓茜, 赵增立, 等. 基于LCA的月饼包装评价[J]. 包装工程, 2006, 27(1): 109—111.
LANG Fang, MA Xiao-qian, ZHAO Zeng-li, et al. Evaluation on Packaging of Moon Cake Based on LCA[J]. Packaging Engineering, 2006, 27(1): 109—111.
- [13] GB/T 24040—2008, 环境管理生命周期评价原则与框架[S].
GB/T 24040—2008, Environmental Management Life Cycle Assessment Principles and Framework[S].
- [14] 曾振兴, 李娜. 产品影响评价指标体系研究[J]. 江西科学, 2013, 31(1): 70—72.
ZENG Zhen-xing, LI Na. Indicator System Study of the Product Impact Assessment[J]. Jiangxi Science, 2013, 31(1): 70—72.
- [15] 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.
XIE Ming-hui, LI Li, HUANG Ze-chun, et al. Life Cycle Assessment of Environmental Impacts of Al-PE-Pa Laminated Packaging and Waste Treatments[J]. Research of Environmental Sciences, 2009, 22(11): 1299—1304.