

基于生命周期设计的绿色包装材料选择

王幽又, 杨随先

(四川大学, 成都 610065)

摘要: **目的** 寻求一种包装设计中进行绿色选材的理论与方法。 **方法** 基于生命周期设计, 通过对材料的功能性、经济性和环境友好性分析, 讨论包装物料的循环模式, 构建绿色包装材料选择的经济性评价模型, 并以一次性饮料杯为例进行了分析验证。 **结果** 列出了不同模式下材料特性优先考虑等级, 给出了材料的环境友好性对选材的影响指数, 以及绿色选材的TOPSIS法解析最优解算法与综合性评价方法。 **结论** 采用TOPSIS法对经济性成本模型及生命周期环境影响指数进行综合求解, 有利于从多种符合生命周期物料循环模式和材料特性关注等级的材料中选择较优材料。

关键词: 生命周期设计; 绿色包装; 材料选择; TOPSIS法

中图分类号: TB484.6 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3563(2015)09-0077-05

Material Selection in Design of Green Package Based on Concept of Life Cycle Design

WANG You-you, YANG Sui-xian

(Sichuan University, Chengdu 610065, China)

ABSTRACT: The aim of this work was to propose the theory and method for selection of green materials in package design. Based on the life cycle design, the functionality, economy and environmental benefits of materials were analyzed, the recycle patterns of package materials was discussed, and the economy evaluation model for selecting green packaging materials was constructed. Material selection of a disposable beverage cup was illustrated as an example using the proposed method. The priority levels of material characteristics selection under different modes were listed in the aspect of functionality. The impact factors on material selection according to environmental benefits were put forward. A TOPSIS algorithm was proposed to obtain optimal solution and comprehensive assessment of green packaging's material selection. In conclusion, getting the comprehensive solution of economic cost model and environmental benefits using the TOPSIS algorithm was beneficial for the selection of the best one from many materials which tally with life-cycle of material circulation model and priority level of material characteristics selection.

KEY WORDS: life cycle design; green packaging; material selection; TOPSIS method

受商品经济影响, 包装产业蓬勃发展, 其废弃物造成的环境危害日益严重, 传统包装已较难满足社会对绿色包装的需求。绿色包装设计正受到越来越多的关注, 相继提出了许多绿色包装理论并开展了一些应用实践, 基于生命周期的绿色包装设计成为绿色包装研究领域的热点之一。包装材料选择是绿色包装

得以实现的关键^[1]。从1970—1992年间, 以包装材料为研究对象进行定性及定量研究的案例就超过往年总和的40%^[2], 近几年对绿色包装选材的关注度更是逐渐提高。在此, 结合生命周期设计理论, 从功能性、经济性和环境友好性等3方面对绿色包装选材进行讨论, 运用经济性评价模型和环境影响性指数, 探讨了

收稿日期: 2014-12-08

作者简介: 王幽又(1990—), 女, 四川人, 四川大学硕士生, 主攻产品设计理论。

通讯作者: 杨随先(1965—), 男, 四川人, 四川大学教授, 主攻产品设计理论、计算机辅助工业设计、机器人结构学、脉冲涡流无损检测。

包装设计中绿色包装材料的选择问题。

1 绿色包装选材三要素

绿色包装选材是一个复杂的多目标决策过程^[3],它综合考虑材料的功能性、经济性和环境友好性等三大要素^[4],功能性包含材料的成分、结构、工艺和性能因素,它保证包装的保护性、方便运输等基本功能的顺利实现;经济性是指材料的性能价格比合理,能节省人力、能源和机械设备费用,保证包装的定价合理;环境友好性是指在包装产品在整个生命周期中,包装产品的使用及其材料的回收与处理对环境负荷低、可再循环、资源利用率高^[5],它决定着包装对环境的影响程度。

在传统包装设计中,对材料的选择主要考查其功能性和经济性,见图1,低成本材料位于C区,高性能先进材料位于B区,天然材料位于A区。而在现代绿色包装设计中,对包装材料的选择则更加注重高功能性、低成本性和低环境负荷,要求三者互相协调平衡,位于D区^[6]。

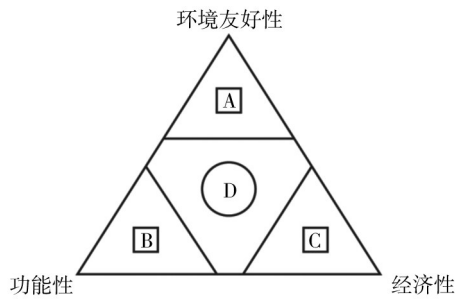


图1 绿色包装材料的三角形性能框架
Fig.1 Triangle performance framework of green package material

2 基于包装功能的物料循环及材料特性

包装材料的选择需要考虑其用途和回收模式,它们决定着选材时需考虑的因素。

参考一般物料循环^[7]并结合生命周期设计,绿色包装材料的生命循环模式可分为闭路循环和开路循环等2种模式,见图2。闭路循环是将回收的包装材料用于原包装制造或通过技术处理让该包装重复利用;开路循环是将回收的包装材料用于其他产品的制造。

在包装设计选材时,根据包装材料的生命循环模式不同,选择材料时对材料特性因素考虑的优先等级

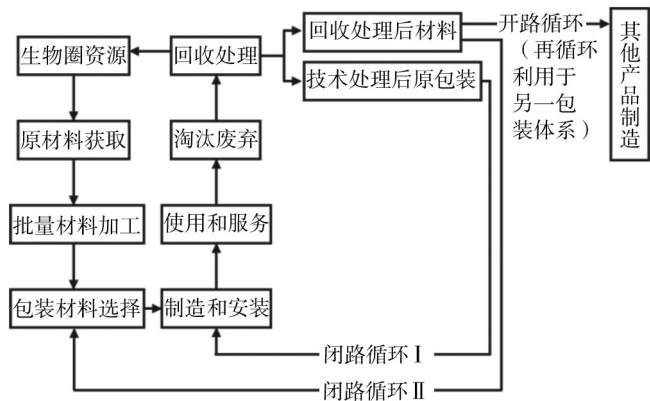


图2 绿色包装材料体系生命循环模式
Fig.2 Life cycle model of green package material system

也不相同。不同循环模式下的材料特性因素等级划分见表1。表1中等级越高表示选择时应优先考虑。

表1 循环方式与材料选择因素等级划分
Tab.1 Material circulation modes and priority levels of the materials

材料特性因素	材料选择循环		
	闭路循环I	闭路循环II	开路循环
耐磨性	Ⅳ级	Ⅱ级	Ⅲ级
抗冲击性	Ⅲ级	Ⅲ级	Ⅲ级
抗风化性	Ⅲ级	Ⅲ级	Ⅲ级
耐腐蚀性	Ⅲ级	Ⅲ级	Ⅲ级
热传导性	Ⅱ级	Ⅱ级	Ⅱ级
热膨胀系数	Ⅱ级	Ⅱ级	Ⅱ级
无毒无害性	Ⅴ级	Ⅴ级	Ⅴ级
可重复使用性	Ⅳ级	Ⅰ级	Ⅳ级
可再制造性	Ⅰ级	Ⅳ级	Ⅳ级
资源稀缺性	Ⅴ级	Ⅴ级	Ⅴ级

1) 闭路循环I选材时需保证包装可重复多次使用。如瑞典等国开发出一种灭菌洗涤技术,使聚酯PET饮料瓶和PE奶瓶可重复再利用达20次以上^[8]。

2) 闭路循环II选材时需保证所选材料易回收分解,具有良好可再制造性。如废旧刊物通过技术处理所得新纸浆生产出再生纸,可100%用于新纸制造^[9]。

3) 开路循环选材时需考虑材料的多方因素,确保能用于新产品生产。

在进行产品包装设计时,首先需要对包装材料进行定性选择,即根据包装回收模式进行包装材料的循环模式选择。根据所选模式下材料的优先等级,筛选出符合条件的几种材料,再结合经济性评价和环境影响评价进行定量分析和选择。

3 基于经济性评价的绿色包装选材

绿色包装选材的经济性成本由传统成本和环境成本等2方面构成^[10]。

3.1 传统成本

传统成本即基于传统包装选材的成本,包括材料的直接成本、加工制造成本、运输成本和回收成本。

1) 直接成本以材料的单位质量作为基础进行直接成本计算^[11]:

$$C_d = \sum_{i=1}^w C_{id}(X) m_{id} \quad (1)$$

式中: $C_{id}(X)$ 为第 i 种材料单位质量直接成本, 元/kg; m_{id} 为第 i 种包装材料质量, kg; w 为选择材料个数。

2) 加工制造成本。对于加工制造过程涉及不同材料的加工性和相关机器或人工费用:

$$C_m = \left(\sum_{j=1}^k \left(\sum_{i=1}^w (C_{ijm}(X) t_i m_{im} + C_{ijp}(X)) \right) \right) \quad (2)$$

式中: $C_{ijm}(X)$ 为第 j 个制造过程单位时间第 i 中材料单位质量成本, 元/(kg·h); $C_{ijp}(X)$ 为第 j 个加工第 i 种材料及其人工费用, 元; m_{im} 为第 i 种包装材料质量, kg; t_i 为第 i 种材料所用时间, h; k 为加工工程个数; w 为选择材料个数。

3) 运输成本。以材料单位质量运输成本作为基础计算:

$$C_t = \sum_{i=1}^w C_{it}(X) m_{it} \quad (3)$$

式中: $C_{it}(X)$ 为第 i 种材料单位质量运输成本, 元/kg; m_{it} 为第 i 种包装材料质量, kg; w 为选择材料个数。

4) 回收成本。根据包装材料的3种不同循环进行分配:

$$\begin{cases} C_r = \sum_{i=1}^w C_{ir}(X) m_{ir} \\ C_{ir}(X) = C_{close1} \mu_1 + C_{close2} \mu_2 + \\ C_{open} (1 - \mu_1 - \mu_2) \end{cases} \quad (4)$$

式中: $C_{ir}(X)$ 为第 i 种材料单位质量回收成本, 元/kg; m_{ir} 为第 i 种材料质量, kg; g 为选择材料个数; C_{close1} 为闭路循环I回收; C_{close2} 为闭路循环II回收; C_{open} 为开路循环回收; μ_1 , μ_2 分别为闭路循环I、II的回收百分比。

综上所述,传统成本总额为:

$$C = C_d + C_m + C_t + C_r$$

3.2 环境成本

环境成本是指包装材料在整个生命周期对环境影响所带来的环境保护与治理所需成本,包括隐蔽的环境成本、责任成本(环境事故和处理费用)和不确定成本(安全与健康风险)^[12]。

1) 隐蔽的环境成本主要与潜在法规相关,同时需考虑部分外延成本,与制造过程无关^[13]。

$$E = E_{ce} + E_{cm} + E_{cp} \quad (5)$$

式中: E_{ce} 为设备检测及维护等费用, 元; E_{cm} 为附加的环境预防及污染控制等费用, 元; E_{cp} 为其他隐蔽成本费用, 元。

2) 责任成本包括违规罚款、对事故处理费用、人员伤亡赔偿等。

$$E_{cr} = E_{cf} + E_{cm} + E_{cp} \quad (6)$$

式中: E_{cf} 为违规罚款等费用, 元; E_{cm} 为人员伤亡赔偿等费用, 元; E_{cp} 为超标排污罚款及未来环境损害责任费, 元。

3) 不确定成本是对一些可能发生或突发情况的预防性成本。以往不确定成本未列入成本设计考虑, 但该成本不能忽视。这里将不确定成本作为一种预估虚拟成本加入成本考虑, 在情况未发生前不参与实际资金运作, 仅作为虚拟成本进行定性考虑。由于其不定性, 通常不遵守统计学原理, 因此无法给出一特定系数。

综上所述,环境成本总额为: $E_c = E_{ce} + E_{cr} + E_{cu}$

4 基于LCA的环境友好性选材评价

包装材料环境友好性的本质是在其生命周期整个过程中具有低的环境负载荷^[13]。绿色包装的环境友好性标准需满足“3R1D原则”^[14]和“五绿模型”^[15]的最基本要求。设计选材时需要结合生命周期评价方法, 建立定量的包装材料环境友好性评价方法。

目前,国内外常用的生命周期评价方法主要有EDIP, EPS 2000, Ecoindicator 99, CML 2001 和 MPACT 2002+等体系^[16]。一些商业化的LCA软件和数据库已经可以应用于包装材料的环境性能评价, 如 Sima Pro, Gabi, EDIP, CML 和 EPS 等^[17-18]。文献[19]通过全生命周期综合评估, 得到PP和PE纸的环境加权评估指数(见表2), 其值越大对环境负荷越小。由表2得出, PE纸杯在材料采用、制造和能耗等方面的缺陷导致其对环境的影响大, PP纸杯虽在资源消耗和可降解上有劣势, 但从全生命周期看对环境

表2 加权评估指数
Tab.2 Weight estimation index

总值	PP纸	PE纸
不可再生消耗	1.388	2.145
能源消耗	1.953	1.609
可再生消耗	1.085	1.017
温室效应	4.255	3.755
酸化	0.891	0.954
固体废物	1.362	1.059
富营养	1.200	0.820
健康风险	2.622	2.622
总值	14.756	13.981

影响较小。

TOPSIS(Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solution)法^[20]是有限方案多目标决策的常用方法。TOPSIS法的决策矩阵为:

$$\begin{bmatrix} \text{方案 1} \\ \vdots \\ \text{方案 } n \end{bmatrix} \begin{bmatrix} y_{11} & \cdots & y_{1M} \\ \vdots & & \vdots \\ y_{N1} & \cdots & y_{NM} \end{bmatrix} \quad (7)$$

式中: y_{11} 表示方案1的第1种影响因素,同理, y_{NM} 表示方案 N 的第 M 种因素影响。

将其规范为标准矩阵:

$$Z_{ij} = \frac{y_{ij}}{\sqrt{\sum_{i=1}^N y_{ij}^2}}, \text{ 其中, } i, j \text{ 为 } 1, 2, \cdots, N.$$

构成加权规范矩阵,其中的元素为:

$$x_{ij}=W_jZ_{ij}, \quad i=1,2,\cdots,M \quad (8)$$

式中: $W_j(j=1,2,\cdots,M)$ 是第 j 个属性的权重。权重并不是固定的,受不同因素影响其权重值不同^[22]。

确定理想解和负理想解:

$$\begin{cases} X^+ = (x_1^+, x_2^+, \cdots, x_M^+) \\ X^- = (x_1^-, x_2^-, \cdots, x_M^-) \end{cases} \quad (9)$$

计算欧式距离:

$$\begin{cases} S_i^+ = \sqrt{\sum_{j=1}^M (x_{ij} - x_j^+)^2} \\ S_i^- = \sqrt{\sum_{j=1}^M (x_{ij} - x_j^-)^2} \end{cases} \quad i=1,2,\cdots,M \quad (10)$$

计算可行解与理想解的相对接近度:

$$\theta_i = \frac{S_i^-}{S_i^- + S_i^+} \quad (11)$$

式中: $0 \leq \theta_i \leq 1, i=1,2,\cdots,M$ 。由大到小排序,值大的方案离理想解近,其可行性优于值小的方案。

5 实例分析

以520 mL容量一次性饮料杯包装为例,此类包装要求无毒无害且不与食物发生任何化学反应,质量较轻。通过物料循环选材模式和材料特性优先考虑等级,定性选出了较合适的PE纸(包含纸质和PE膜)和PP塑料等2种材料,并根据经济性模型和环境友好性评价模型,采用TOPSIS法求解选出最优解。

1) 经济性计算。

对PE纸杯:

$$C=C_d+C_m+C_l+C_r=0.22, E_e=E_{ch}+E_{cr}+E_{cu}=0.06;$$

对PP杯:

$$C=C_d+C_m+C_l+C_r=0.19, E_e=E_{ch}+E_{cr}+E_{cu}=0.03。$$

2) 用TOPSIS法进行环境友好性评价求解。将

$$\begin{bmatrix} \text{PE 纸杯} \\ \text{PP 杯} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0.28 & 13.981 \\ 0.22 & 14.756 \end{bmatrix}, \text{ 转化为标准型矩阵为:}$$

$$Z_{ij} = \begin{bmatrix} 0.7863 & 0.6878 \\ 0.6178 & 0.7259 \end{bmatrix}。$$

取目标权重 W 为 $[0.4 \ 0.6]$,转化为加权矩阵为:

$$X_{ij} = \begin{bmatrix} 0.3145 & 0.4127 \\ 0.2471 & 0.4355 \end{bmatrix}$$

确定理想解 $X^+=(0.2471 \ 0.4127)$,负理想解 $X^-= (0.3145 \ 0.4355)$ 。

理想解与负理想解的欧式距离为:

$$\begin{cases} S_2^+ = 0.0674 \\ S_1^- = 0.0288 \end{cases}, \begin{cases} S_2^- = 0.0228 \\ S_2^+ = 0.0674 \end{cases}$$

由此得相对贴近度为: $\theta_1=0.2994, \theta_2=0.7472$ 。

结果表明: $0 < \theta_1 < \theta_2 < 1$,说明PP杯可行性比PE纸杯高,PE纸杯对环境的影响度更高。

在上述实例求解过程中,权重并不是固定的,受不同的评价指标及地域性影响。

6 结语

从包装功能和包装材料回收模式出发,给出了绿色包装材料生命周期循环的闭循环和开循环。给出了材料特性的优先关注度等级划分,为初步选材提供了定性判断;建立了绿色选材经济性评价模型,从整个生命周期进行成本考虑,给出了绿色包装成本估算的定量化参考;采用TOPSIS法对经济性成本模型及生命周期环境影响指数进行综合求解,得出较优解。该方法有利于从多种符合生命周期物料循环模式和材料特性关注等级的材料中选择较优材料。

目前,绿色包装选材相关的生命周期评价方法还不甚全面,数据库还较少,建立更为全面细致的评价方法还有待继续研究。

参考文献:

- [1] 韩旭东,赵鸣. 浅谈绿色材料的开发和应用[J]. 山西高等学校社会科学学报,2003,15(1):53—54.
HAN Xu-dong, ZHAO Ming. On Development and Application of Green Materials[J]. Social Sciences Journal of Colleges of Shanxi, 2003, 15(1): 53—54.
- [2] REBIZERA G, EKVALB T, FRISCHKNECHT R, et al. Life Cycle Assessment Part 1: Framework, Goal and Scope Definition, Inventory Analysis, and Applications[J]. Environment International, 2004, 30: 701—720.
- [3] GIUDICE F, LA ROSA G, RISITANO A, Material Selection in the Life-cycle Design Process: A Method to Integrate Mechanical and Environment in Optimal Choice[J]. Materials and Design, 2005, 26: 9—20.
- [4] 周长春,殷国富,胡晓兵,等. 面向绿色设计的材料选择多目标优化决策[J]. 计算机集成制造系统, 2008, 14(5): 1023—1028.
ZHOU Chang-chun, YIN Guo-fu, HU Xiao-bing, et al. Multi-objective Optimization Decision-making of Material Selection Oriented to Green Design[J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2008, 14(5): 1023—1028.
- [5] 何伟. 包装材料的发展趋势及设计原则[J]. 湖南工业大学学报, 2009, 14(5): 72—76.
HE Wei. The Development Trend of Packaging Materials and Design Principles[J]. Journal of Hunan University of Technology Social Science Edition, 2009, 14(5): 72—76.
- [6] 骆光林. 绿色包装材料[M]. 北京: 化学工业出版社, 2005.
LUO Guang-lin. Green Package Material[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2005.
- [7] 张成,浦耿强,王成焱. 基于生命周期的汽车回收及其循环经济模型[J]. 机械设计与研究, 2003(3): 67—69.
ZHANG Cheng, PU Geng-qiang. Automobile Recycling and Recycling Economy Model Based on the Life-cycle[J]. Machine Design and Research, 2003(3): 67—69.
- [8] 黄跃. 绿色包装材料浅谈[J]. 南平师专学报, 2006, 25(2): 34—39.
HUANG Yue. Research on Green Packing Materials[J]. Journal of Nanping Teachers College, 2006, 25(2): 34—39.
- [9] 李守泽. 绿色材料研究综述[J]. 中国制造业信息化, 2010, 39(11): 1—5.
LI Shou-ze, LI Xiao-song, YU Jian-jun. Green Materials Research and Development[J]. Manufacture Information Engineering of China, 2010, 39(11): 1—5.
- [10] 陈晓川,田怀宇. 绿色设计与面向成本的设计[J]. 机械设计, 2006, 23(2): 4—6.
CHEN Xiao-chuan, TIAN Huai-yu. Green Design and Design Facing cost[J]. Journal of Machine Design, 2006, 23(2): 4—6.
- [11] 黄海鸿,刘光复,刘志峰,等. 绿色设计中的材料选择多目标决策[J]. 机械工程学报, 2006, 42(8): 131—136.
HUANG Hai-hong, LIU Guang-fu, LIU Zhi-feng, et al. Multi-objective Decision-making of Materials Selection in Green Design[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2006, 42(8): 131—136.
- [12] 戴宏民. 绿色包装[M]. 北京: 化工工业出版社, 2002.
DAI Hong-min. Green Package[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2002.
- [13] 孙启祥. 从生命周期角度评估木材的环境友好性[J]. 安徽农业大学学报, 2001, 28(2): 170—175.
SUN Qi-xiang. Assessment on Environmental Friendly Characteristics of Wood from Angle of Life Cycle[J]. Journal of Anhui Agricultural University, 2001, 28(2): 170—175.
- [14] 许彧青. 浅议绿色包装设计的“3R1D”原则[J]. 机械设计, 2004, 21(S1): 48—49.
XU Yu-qing. A Tentative Exploration of "3R1D" Principle of Green Packing Design[J]. Journal of Machine Design, 2004, 21(S1): 48—49.
- [15] 孙容芳,伍军. 绿色包装的发展趋势[J]. 塑料包装, 2011, 21(6): 6—8.
SUN Rong-fang, WU Jun. The Development Trend of Green Packaging[J]. Plastic Packaging, 2011, 21(6): 6—8.
- [16] 段宁,程胜高. 生命周期评价方法体系及其对比分析[J]. 安徽农业科学, 2008, 36(32): 13923—13925.
DUAN Ning, CHENG Sheng-gao. Outline and Contrast Analysis of Life Cycle Assessment Methodologies[J]. Journal of Anhui Agricultural Sciences, 2008, 36(32): 13923—13925.
- [17] HUANG C C, MA H W. A Multidimensional Environmental Evaluation of Packaging Material[J]. Science of the Total Environment, 2004, 324: 161—172.
- [18] BOVEA M D, GALLARDO A. The Influence of Impact Assessment Methods on Materials Selection for Eco-design[J]. Materials and Design, 2006, 27: 209—215.
- [19] 闫宇飞. 一次性塑料水杯与涂层纸杯的生命周期评价与分析[J]. 环境科学与管理, 2011, 36(6): 174—179.
YAN Yu-fei. Life Cycle Assessment and Analysis of Disposable Plastic Cups and Paper Cups[J]. Environmental Science and Management, 2011, 36(6): 174—179.
- [20] 徐南荣,钟伟俊. 科学决策理论与方法[M]. 南京: 东南大学出版社, 1995.
XU Nan-rong, ZHONG Wei-jun. Scientific Decision-making Theory and Method[M]. Nanjing: Southeast University Press, 1995.
- [21] 曹杰,赵立权. 绿色材料评价体系及方法的研究[J]. 华东船舶工业学院学报: 自然科学版, 2003, 12(6): 63—66.
CAO Jie, ZHAO Li-quan. Study on Evaluation System and Method of Green Material[J]. Journal of East China Shipbuilding Institute: Natural Science Edition, 2003, 12(6): 63—66.