

基于包装全生命周期的绿色制造技术体系

Green manufacturing technology system based on the whole life cycle of packaging

张立祥 汪利萍 闫磊磊

ZHANG Li-xiang WANG Li-ping YAN Lei-lei

(安徽理工大学机械工程学院, 安徽 淮南 232001)

(College of Mechanical Engineering, Anhui University of Science and
Technology, Huainan, Anhui 232001, China)

摘要:以包装全生命周期为主线,提出了一种绿色包装制造技术体系。从绿色设计技术、绿色材料选择技术、绿色生产技术、绿色回收处理技术和绿色制造评估技术五大关键层进行展开,建立一个较为完整的绿色包装制造技术体系。以某豆制品包装设计为例,应用该技术体系设计分析并评估。实例表明,应用该技术体系有助于在全生命周期早期对包装绿色度的判断。

关键词:全生命周期;绿色包装制造技术体系;五大关键层;绿色度

Abstract: Taking the whole life cycle of packaging as the main line, a green packaging manufacturing technology system is proposed. From the five key layers of green design technology, green material selection technology, green production technology, green recycling and treatment technology, green manufacturing evaluation technology, to establish a relatively complete green packaging manufacturing technology system. Taking the packaging design of soybean products as an example, the technical system was applied to analyze and evaluate the packaging design. The example shows that the application of the technology system is helpful to judge the green degree of packaging in the early stage of the whole life cycle, and provides guidance and reference for the research and application of green manufacturing of packaging.

Keywords: full life cycle; green packaging manufacturing technology system; five key layers; green degree

近些年来包装行业快速发展,在促进经济增长与社会进步的同时,也带来极其严重的环境问题,包装废弃物

逐年增多。据统计,在中国特大城市中,包装垃圾增量已占到生活垃圾增量的 93%^[1],2015 年欧盟 24 国包装废弃物总量为 8 450 万 t^[2],在这种情况下,绿色包装作为一种全新的包装理念掀起了一股以保护生态环境为核心的绿色浪潮。本研究拟建立一套绿色包装制造技术体系,由关键技术层展开分析,并结合生产实例进行评估,以期对包装的绿色制造提供有效的参考。

1 绿色包装制造概述

绿色包装制造并非指传统意义上的“小制造”概念,即包装制造加工过程,而是指以 4R1D(即 reduce 减量、reuse 再利用、recover 恢复、recycle 回收循环、degradable 可降解^[3])为指导原则,在生命周期过程中,涉及到包装设计、物料选择、生产计划、生产过程、质量保证、经营管理、市场销售、回收处理等一系列相关活动和作业的总称。绿色包装制造强调在包装的全生命周期中最大程度地节约资源和能源,降低对人体健康和生态环境的危害,并且满足功能需求且使用效率高^[4-5]。中国对绿色包装制造的研究起步较晚,相对于发达国家仍存在一定差距。

目前,国内外学者对绿色包装做了一些相关研究。Euihark 等^[6]基于 LCA 提出了一种基于排序的决策框架来评估包装设计对环境的影响,解决不同的环境影响因素之间的相互矛盾;Khalil 等^[7]将纤维素纳米纤维用于可持续包装,并指出可持续包装的目标是将功能性和创新性材料使用在包装上,使产品包装的成本最小化并减少环境污染;Daniele 等^[8]从环境可持续性的角度,比较了两种用于家庭生活的包装形式,采用 LCA 法对两种包装体系进行排序,并提出一种新的包装方式将对环境的影响降低了 30%;Tom 等^[9]使用基于 LCA 的工具 EnvPack 分析 3 种食物包装在包装链中对环境造成负担的根本原因; Tajik 等^[10]致力于开发出可降解的可持续绿色包装来

基金项目:山西省科技重大专项(编号: MJ2016-02)

作者简介:张立祥(1966—),男,安徽理工大学教授,硕士。

E-mail: 871525617@qq.com

收稿日期: 2019-02-25

降低包装对环境的影响;刘飞等^[11]从绿色包装设计技术、绿色包装材料选择技术和绿色包装回收处理技术三方面介绍了绿色包装技术体系;徐锋等^[12]提出基于低碳与成本约束的机电产品包装概念设计模式,给出机电产品包装概念设计阶段的低碳与成本计算规则和方法。国内外学者从不同的角度对绿色包装相关概念进行了研究,但比较分散,尚未形成绿色包装制造技术体系,而该技术体系涉及包装的全生命周期以及多种行业技术的交叉,技术体系复杂,尤其中国的绿色包装制造起步较晚,更需进一步完善与明确。

2 基于包装全生命周期的绿色制造技术体系

2.1 绿色包装的全生命周期

传统的包装开发流程一般由原材料到报废呈直线发展(图 1),在整个流程中,将会产生很多的生态成本,如材料的消耗、能源的浪费以及废弃物的产生等。而绿色包装全生命周期遵循环境友好、可持续发展的原则^[13](图 2)涵盖了包装从原材料、设计、制造生产、使用和回收等过程中的环境特性与资源属性。

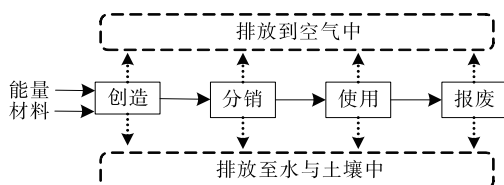


图 1 传统包装生命周期快速分析

Figure 1 Rapid analysis of traditional packaging life cycle

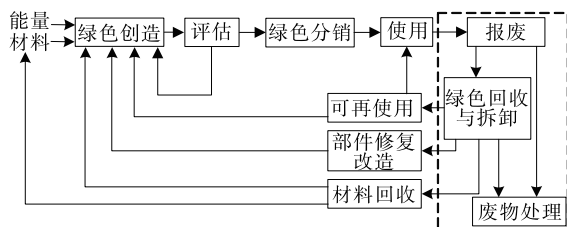


图 2 绿色包装的全生命周期快速分析

Figure 2 Rapid life cycle analysis of green packaging

如图 3 所示,在绿色包装的全生命周期中,制造体系涉及到多个制造环节的影响,需要对每个阶段展开关键技术描述,整个体系受绿色制造评估技术与标准法规的影响,并不断完善与修正。

2.2 绿色包装制造关键技术层分析

2.2.1 绿色包装设计技术 绿色包装设计,又称为面向环境的包装设计(Packaging Design for Environment, PD-FE),是指在设计中,基于包装生命周期原理,将包装的环境属性和基本属性作为设计目标,借助各种设计技术。

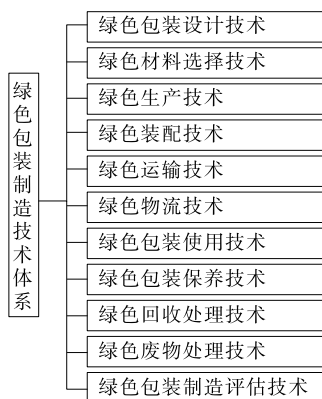


图 3 绿色包装制造技术体系

Figure 3 Green packaging manufacturing technology system

如图 4 所示,在保证包装应有的基本功能、使用寿命、经济性和质量等前提下,使设计出的包装具有良好的环境协调性。绿色包装设计强调可持续发展的环境战略,要从根本上减少对环境影响和降低资源消耗,关键在于设计阶段,不能等包装产生了不良的环境后果再采取防治措施。



图 4 绿色包装设计技术

Figure 4 Green packaging design technology

2.2.2 绿色包装材料选择技术 包装所使用的材料,不仅影响到包装的功能也决定了包装的绿色性能^[14],针对包装的选材要秉持着功能性、环境性和经济性原则,提倡包装使用可循环再生或者对环境危害较低的材料,降低难回收利用材料的使用率,通常会选用可降解包装材料、可回收包装材料和可食性包装材料等。传统的选材方法

主要有经验选材技术和半经验选材技术等,考虑较多的是材料的功能属性和经济属性,很少考虑材料对环境与资源的影响。绿色包装选材技术主要有价值分析选材技术、目标函数选材技术、三维分析选材技术和模糊综合评估选材技术,其基于可持续发展的观点,将材料的环境属性纳入考虑范畴以适应现代社会、环境和经济的发展要求。选材方法见图 5。

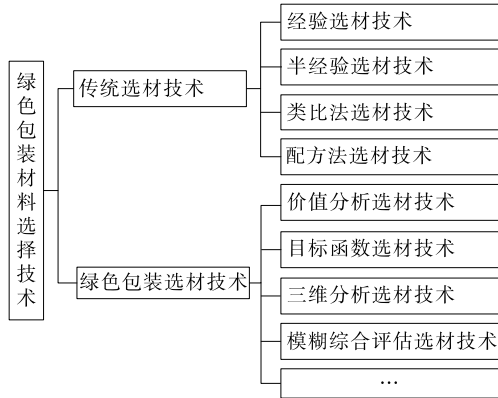


图 5 绿色包装材料选择技术

Figure 5 Green packaging material selection technology

2.2.3 绿色包装生产技术 绿色包装生产技术是指在制造过程中采用先进的制造技术降低生产过程中产生的各种能源与资源的消耗,减少废弃物与对环境和人体有害的物质产生。重点在于实施绿色包装印刷技术,构建先进包装印刷数字化体系,利用互联网、大数据和人工智能等技术,发展云印刷、合版印刷、网络印刷及个性化印刷等新型包装印刷方式,如图 6 所示。

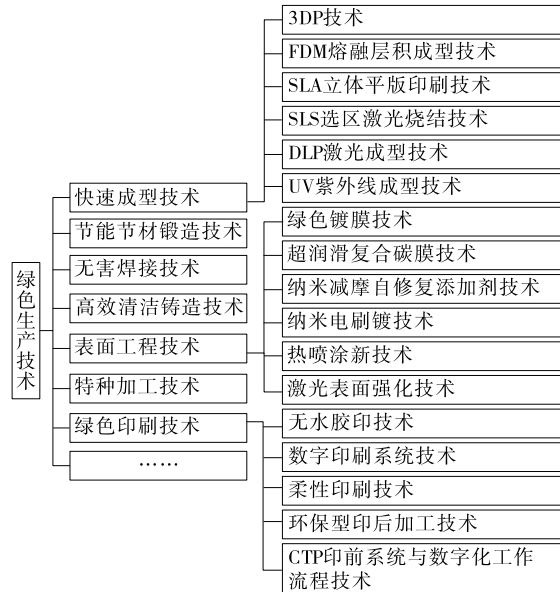


图 6 绿色包装生产技术

Figure 6 Green packaging production technology

2.2.4 绿色包装回收处理技术 绿色包装回收技术主要包括重复使用,回收利用,废弃物处理。如图 7 所示,包装的回收技术是绿色包装制造技术体系实现“从摇篮到摇篮”的关键技术,包装报废后可通过重复使用延长生命周期,或通过材料的方式回收,对于不可再使用的包装进行对环境与人体最低危害的销毁,提高包装对环境的适应性。

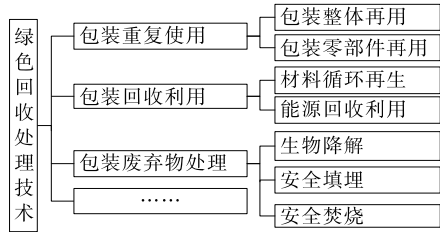


图 7 绿色包装回收处理技术

Figure 7 Green packaging recycling technology

2.2.5 绿色包装制造评估技术 在包装的全生命周期前期,重点在创造阶段,进行包装制造的评估,提早进行数据采集评估以及即时反馈控制,降低材料与能源的消耗及对环境的污染。绿色包装制造评估技术是绿色制造技术的保障^[15],从源头上使整个包装产业端朝资源利用合理化,废物减量化,污染轻度化方向发展,具体评估方法:

(1) 建立因素集,一级因素集为环境指标 U_1 、回收指标 U_2 、成本指标 U_3 、功能指标 U_4 ,二级因素集为绿色材料使用率 U_{11} 、对环境有害物质 U_{12} 、固体废弃物 U_{13} 等,评判因素集可描述为 $U = \{U_1, U_2, \dots, U_n\}$, $U_n = \{U_{n1}, U_{n2}, \dots, U_{nm}\}$ 等,如图 8 所示。

(2) 建立评价集,运用四级法,用优良中差来度量不同等级,相对应为 $V = \{v_1, v_2, v_3, v_4\}$ 。组织专家对各个因素进行度量,专家人数为 m ,通过评判优、良、中、差的人数来确定各因素的隶属度,对应表 1,如“绿色材料使用率”10 位评审专家评判结果为优 8 人,良 1 人,中 1 人,差 0 人,则其隶属度为 $(0.80, 0.10, 0.10, 0.00)$,同理可得其他因素隶属度,从而建立二级评价矩阵 R_n 。

(3) 建立权重集,运用层次分析法确定各因素权重,由于专家打分主观性较强,通过粒子群优化算法对打分矩阵进行修正,得出一级权重 $A = \{A_1, A_2, \dots, A_n\}$,二

表 1 专家打分标度

Table 1 Expert marking scale

打分标度	含义	打分标度	含义
1(1)	同等重要	6(1/6)	稍非常(不)重要
2(1/2)	稍稍微(不)重要	7(1/7)	非常(不)重要
3(1/3)	稍微(不)重要	8(1/8)	稍绝对(不)重要
4(1/4)	稍比较(不)重要	9(1/9)	绝对(不)重要
5(1/5)	比较(不)重要		

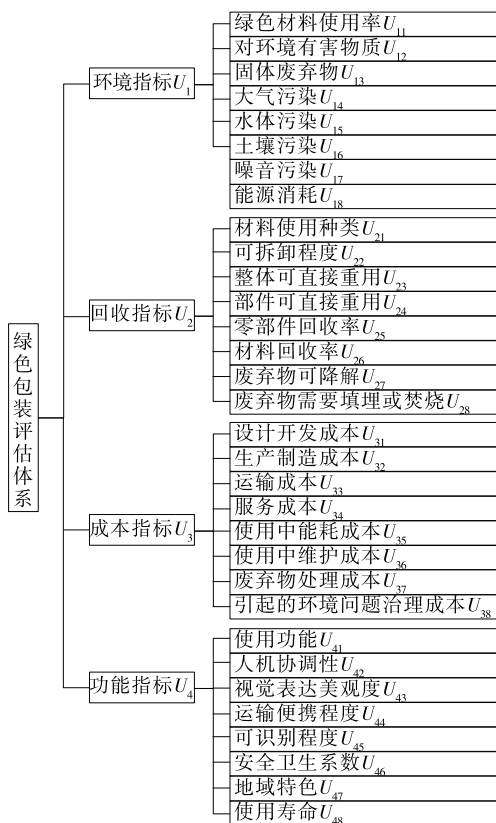


图 8 绿色包装评估体系

Figure 8 Green packaging evaluation system

级权重 $A_n = \{A_{n1}, A_{n2}, \dots, A_{nm}\}$ 。

(4) 计算一级模糊综合评价矩阵, 计算二级模糊综合评价矩阵 $B_n = A_n \times R_n$, 将 B_n 归一化处理, 构成一级评价矩阵 $R = [B_1 \ B_2 \ B_3 \ B_4]^T$, 最后计算一级模糊综合评价矩阵 $B = A \times R$, 并通过归一化处理, 参考最大隶属度原则, 确定该方案的优劣等级。

3 实例分析

针对某款豆制品包装设计方案为例, 如图 9、10 所示。该包装内部产品包括腐乳、豆渣酱和豆渣煎饼, 结合当地特色豆腐文化以及当地特色风景名胜设计其外观, 整个包装的主旨为“源”, 包装内含有黄豆种子, 在包装完成其基础功能之后, 可用于种植盆栽, 如图 11 所示。包装盒是通过黄豆秸秆处理加工成复合材料用于 3D 打印制备。整个制造及使用流程不仅展现了当地特色文化, 也符合绿色包装主旨, 溯本求源。

对该包装进行数据采集进行绿色度判断:

(1) 对应图 8 确定因素集。

(2) 请该领域专家进行评分, 通过层次分析法确定各因素权重。

一级权重: $A = \{0.28, 0.19, 0.05, 0.48\}$;



图 9 包装整体设计方案

Figure 9 Overall package design

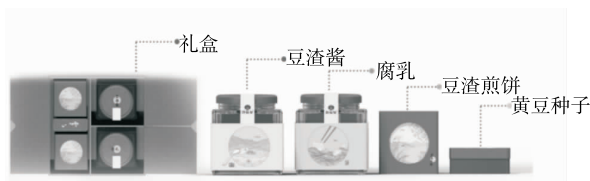


图 10 包装内部设计方案

Figure 10 Packaging internal design

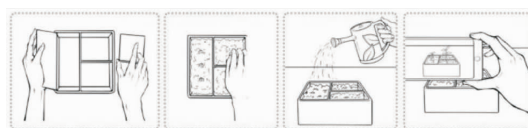


图 11 包装使用说明

Figure 11 Packaging instructions

二级权重: $A_1 = \{0.07, 0.16, 0.06, 0.21, 0.18, 0.18, 0.04, 0.10\}$;

$A_2 = \{0.13, 0.06, 0.45, 0.14, 0.08, 0.08, 0.04, 0.02\}$;

$A_3 = \{0.16, 0.30, 0.03, 0.04, 0.18, 0.06, 0.09, 0.13\}$;

$A_4 = \{0.27, 0.08, 0.03, 0.07, 0.10, 0.29, 0.05, 0.12\}$ 。

(3) 确定各因素隶属度, 得到各级评判矩阵。

二级评价矩阵:

$$R_1 = \begin{bmatrix} 0.80 & 0.10 & 0.10 & 0.00 \\ 0.70 & 0.10 & 0.10 & 0.10 \\ 0.70 & 0.00 & 0.20 & 0.10 \\ 0.50 & 0.20 & 0.20 & 0.10 \\ 0.60 & 0.30 & 0.10 & 0.00 \\ 0.60 & 0.20 & 0.20 & 0.10 \\ 0.70 & 0.10 & 0.10 & 0.10 \\ 0.50 & 0.20 & 0.20 & 0.10 \end{bmatrix};$$

$$R_2 = \begin{bmatrix} 0.70 & 0.20 & 0.10 & 0.00 \\ 0.70 & 0.10 & 0.10 & 0.10 \\ 0.90 & 0.10 & 0.00 & 0.00 \\ 0.90 & 0.10 & 0.00 & 0.00 \\ 0.50 & 0.30 & 0.20 & 0.00 \\ 0.70 & 0.20 & 0.10 & 0.00 \\ 0.80 & 0.10 & 0.10 & 0.00 \\ 0.50 & 0.30 & 0.10 & 0.10 \end{bmatrix};$$

$$R_3 = \begin{bmatrix} 0.60 & 0.20 & 0.20 & 0.00 \\ 0.70 & 0.10 & 0.20 & 0.00 \\ 0.50 & 0.20 & 0.20 & 0.10 \\ 0.50 & 0.10 & 0.30 & 0.10 \\ 0.70 & 0.10 & 0.20 & 0.00 \\ 0.80 & 0.10 & 0.10 & 0.00 \\ 0.60 & 0.30 & 0.10 & 0.00 \\ 0.80 & 0.10 & 0.10 & 0.00 \end{bmatrix};$$

$$R_4 = \begin{bmatrix} 0.70 & 0.30 & 0.00 & 0.00 \\ 0.80 & 0.10 & 0.10 & 0.00 \\ 0.80 & 0.20 & 0.00 & 0.00 \\ 0.70 & 0.20 & 0.10 & 0.00 \\ 0.80 & 0.10 & 0.10 & 0.00 \\ 0.70 & 0.10 & 0.20 & 0.00 \\ 0.80 & 0.20 & 0.00 & 0.00 \\ 0.90 & 0.10 & 0.00 & 0.00 \end{bmatrix}。$$

通过计算并归一化处理得出二级模糊综合评价阵:

$$B_1 = A_1 R_1 = [0.513 \ 0 \ 0.179 \ 0 \ 0.155 \ 0 \ 0.075 \ 0];$$

$$B_2 = A_2 R_2 = [0.802 \ 0 \ 0.141 \ 0 \ 0.049 \ 0 \ 0.008 \ 0];$$

$$B_3 = A_3 R_3 = [0.673 \ 0 \ 0.136 \ 0 \ 0.174 \ 0 \ 0.007 \ 0];$$

$$B_4 = A_4 R_4 = [0.757 \ 0 \ 0.170 \ 0 \ 0.083 \ 0 \ 0.000 \ 0]。$$

组合构成一级评价矩阵 $R = [B_1 \ B_2 \ B_3 \ B_4]^T$, 计算并归一化处理得出一级模糊综合评价矩阵 $B = A \times R = [0.693 \ 0 \ 0.165 \ 3 \ 0.101 \ 3 \ 0.022 \ 9]$ 。根据最大隶属度原则知 0.693 0 为最大值, 则对应该设计方案评价结果为优。所以该豆制品包装在整个生命周期内在满足基本功能需求的基础上对环境的危害较低, 可以放心投入生产。

4 结论

(1) 以 4R1D 为核心, 从绿色设计技术、绿色材料选择技术、绿色生产技术、绿色回收处理技术和绿色制造评估技术五大关键层进行展开, 建立一个基于包装全生命周期的绿色制造技术体系。以实例为证, 应用该技术体系有助于在全生命周期早期对包装绿色度的判断, 在包装对环境造成负担前采取解救措施, 从根本上降低对环境的影响, 为包装的绿色制造研究与应用提供了指导与参考。

(2) 由于包装绿色制造技术涉及包装全生命周期, 同时又是制造技术、环境技术以及管理技术等多学科的交叉与融合, 技术内涵和技术体系复杂, 并且随着时代发展在不断地更新, 所以本研究所构建的技术体系仍需要不断完善, 今后将在上述方面做出努力和探讨。

参考文献

[1] 人民网. 科技创新让包装行业更有“内涵”[EB/OL]. (2018-07-18) [2019-02-20]. [http:// ip.people.com.cn/n1/2018/0718/c179663-30154305.html](http://ip.people.com.cn/n1/2018/0718/c179663-30154305.html).

[2] EUROSTAT. Packaging waste [EB/OL]. (2018-12-06) [2019-02-20]. [https:// ec.europa.eu/ eurostat/ statistics-explained/ index.php? title= Packaging_ waste_ statistics](https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php?title=Packaging_waste_statistics).

[3] 武军, 李和平. 绿色包装[M]. 2 版. 北京: 中国轻工业出版社, 2007: 11-12.

[4] 陶永, 李秋实, 赵昱. 面向产品全生命周期绿色制造策略[J]. 中国科技论坛, 2016(9): 58-64.

[5] 宾鸿赞, 王润孝. 先进制造技术[M]. 北京: 高等教育出版社, 2006: 19-21.

[6] EUIHARK L, QI Hui-hui, GEA H C. Decision making framework using probabilistic pareto for sustainable packaging life cycle assessment[J]. Journal of Applied Packaging Research, 2016, 8(2): 17-31.

[7] KHALIL H, DAVOUDPOUR Y, SAURABH C, et al. A review onnanocellulosic fibres as new material for sustainable packaging: Process and applications[J]. Renewable & Sustainable Energy Reviews, 2016, 64: 823-836.

[8] DANILELE L, LEONARDO P, PAOLO C. Study and design of sustainable packaging for household hoods[C]// ASME 2018 International Design Engineering Technical Conferences and Computers and Information in Engineering. Quebec; ASME Press, 2018: 1-10.

[9] TOM N, LIGTHART E U, THODEN V V. Marieke Brouwer EnvPack an LCA-based tool for environmental assessment of packaging chains Part 1: Scope, methods and inventory of tool[J]. The International Journal of Life Cycle Assessment, 2018, 8: 1-15.

[10] TAJIK S, MAGHSOUDLOU Y, FARAMARZ K, et al. Soluble soybean polysaccharide: A new carbohydrate to make ambiodegradable film for sustainable green packaging[J]. Carbohydrate Polymers, 2013, 97(2): 817-824.

[11] 刘飞, 李聪波, 曹华军, 等. 基于产品生命周期主线的绿色制造技术内涵及技术体系框架[J]. 机械工程学报, 2009, 45(12): 115-120.

[12] 徐锋, 纪杨建, 祁国宁. 基于低碳与成本约束的机电产品包装概念设计[J]. 机械工程学报, 2014, 50(10): 199-205.

[13] 童玲, 张剑. 传统食品包装设计流程研究[J]. 食品与机械, 2016, 32(9): 95-98.

[14] CUQ B, GONTARD N, GUILBERT S. Proteins as agricultural polymers for packaging production[J]. Cereal Chemistry, 2018, 75(1): 1-9.

[15] 孙良峰, 裴乐森, 张树有, 等. 面向绿色选材的复杂产品材料回收策略模型及应用[J]. 机械工程学报, 2013, 49(11): 143-152.