

基于生命周期评价的家电产品 EPS 包装碳足迹核算与分析

doi:10.20269/j.cnki.1674-7100.2025.6006

杨旭霞^a 王海军^a

李志强^{a,b} 王杰^a

陕西科技大学

a. 轻工科学与工程学院

b. 轻化工程国家级实验教学

示范中心

陕西 西安 710021

摘要: 为促进家电行业的低碳减排进程, 对家电产品使用的可发性聚苯乙烯(EPS)包装进行碳足迹评估, 进而探讨EPS包装方案的优化策略。基于生命周期评价(LCA)理论, 运用生命周期清单分析法, 对EPS从原材料获取、生产、打包整理、运输和回收废弃等阶段的碳排放量进行系统性统计与分析。研究结果显示, 烹饪机的EPS碳排放量总量为6.7824 kg CO₂eq, 其LCA碳足迹为8.4152 kg CO₂eq。进一步分析表明, 在EPS包装的碳足迹中, 原材料生产阶段对全球变暖的贡献占比为53.3%, 此阶段是实现碳减排的关键。通过优化能源结构、显著提升EPS回收率、优化包装设计, 是实现“碳达峰、碳中和”目标的重要途径。

关键词: EPS; 生命周期评价; 碳足迹; 烹饪机; 包装方案; 回收率

中图分类号: TB482.2 **文献标志码:** A

文章编号: 1674-7100(2025)06-0047-08

引文格式: 杨旭霞, 王海军, 李志强, 等. 基于生命周期评价的家电产品 EPS 包装碳足迹核算与分析 [J]. 包装学报, 2025, 17(6): 47-54.

1 研究背景

在全球积极推进建碳达峰碳中和工作中, 产品碳足迹(product carbon footprint, PCF)^[1]正在成为新型国际贸易壁垒。为应对这一挑战, 2023年11月29日, 中国家用电器协会双碳工作组(CHEAA WG2)在第五次会议上, 一致通过了《家用电器产品碳足迹核算指南》《房间空气调节器碳足迹核算细则》以及《家用冰箱碳足迹核算细则》3项家电产品碳足迹核算标准^[2]。作为衡量低碳性能的关键指标, 产品碳足迹被应用于识别和评估产品生命周期的温室气体排放量, 涵盖CO₂、CH₄、N₂O、氢氟碳化物(HFCs)、全氟碳化合物(PFCs)等多种气体^[3-5]。在进行碳足迹的核算过程中, 国际社会广泛采用IPCC数据库, 并以全

球变暖潜值(global warming potential, GWP)作为评估环境影响类别的关键指标, 核算结果最终以二氧化碳当量(CO₂eq)的形式呈现^[6]。

根据北京恒州博智国际信息咨询有限公司(QY Research)发布的《2024—2030中国可发性聚苯乙烯市场现状研究分析与发展前景预测报告》, 近年来, 国内可发性聚苯乙烯(EPS)材料的产能增长显著。2018年中国EPS累计产能为670万t, 到2023年已突破1000万t, 增长率超过50%。这一增长主要得益于国内建筑、包装等行业对EPS材料的旺盛需求。EPS以轻质、高强度和出色的缓冲性能, 成为保护电子产品、食品、医药等物品在运输过程中免受损坏的理想材料, 是EPS的第二大重要应用方向。电子商务平台和物流行业的快速发展促进了包装需求的持

收稿日期: 2025-04-24

作者简介: 杨旭霞, 女, 硕士生, 主要研究方向为智能运输包装, E-mail: 15203218439@163.com

通信作者: 李志强, 男, 副教授, 主要从事绿色包装技术研究, E-mail: lizq@sust.edu.cn

续上升，到2030年，中国EPS包装市场规模有望达到1000亿元人民币。然而，在环境保护标准日益提高的背景下，EPS在包装领域的应用正面临前所未有的挑战与机遇。EPS的可降解性与可回收性，已成为其可持续发展的核心要素。因此，对EPS进行碳足迹核算尤为重要。精确核算EPS碳足迹，能够清晰呈现其从生产到废弃全生命周期的碳排放状况，为企业改进生产工艺、降低能耗、提升环保水平提供关键依据，助力EPS产业在满足市场需求的同时，更好地契合绿色发展潮流。

综上，本研究聚焦于家电产品——烹饪机，基于生命周期评价（life cycle assessment, LCA）深入探究EPS包装方案的碳足迹，旨在通过精准核算烹饪机EPS包装的碳足迹，为烹饪机包装的优化设计提供科学依据，有效降低其碳排放，进而为家电包装行业实现绿色转型贡献力量。

2 LCA 理论

LCA方法是一种系统化评估产品或服务在整个生命周期中对环境、资源消耗及人类健康影响的工具。它涵盖从原材料获取、生产、运输、使用到最终废弃或回收的全过程，旨在识别环境热点、优化可持续性决策。作为系统化的环境管理工具，LCA方法在碳足迹研究领域具有显著优势，尤其适用于碳排放源的系统识别、全生命周期数据的结构化采集以及碳排放核算过程的机理分析。童庆蒙等^[7]对ISO国际标准系列、温室气体核算体系（greenhouse gas protocol, GHG Protocol），以及英国、日本、欧盟等国家和地区的LCA碳足迹核算标准及实践进行了系统性的整理与分析。研究指出，尽管各标准之间存在差异，但国际化和普适性是其未来发展的共同趋势。ISO 14040: 2006 *Environmental Management—Life Cycle Assessment—Principles and Framework*、ISO 14044: 2006 *Environmental Management—Life Cycle Assessment—Requirements and Guidelines*共同构成了LCA的基本框架；ISO 14067: 2013 *Greenhouse Gases—Carbon Footprint of Products—Requirements and Guidelines for Quantification*将LCA作为量化产品碳足迹的技术方法；GHG Protocol针对不同组织和产品制定了核算标准；PAS 2050: 2008 *Specification for the Assessment of the Life Cycle Greenhouse Gas Emissions of Goods and Services*是全球最早的产品碳

足迹方法标准，应用广泛。根据ISO 14040国际标准，LCA实施流程包含4个核心阶段：目标与范围定义（goal and scope definition）、生命周期清单分析（life cycle inventory, LCI）、生命周期影响评价（life cycle impact assessment, LCIA）以及基于系统思维的生命周期解释（life cycle interpretation）^[8]。LCA实施流程如图1所示。

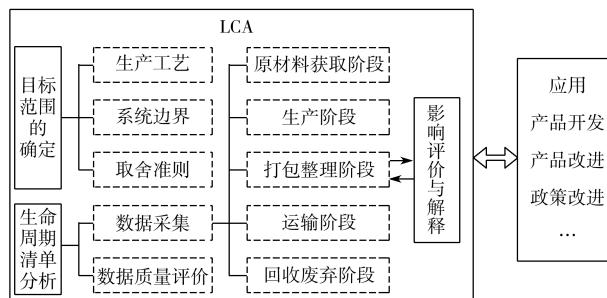


图1 LCA流程

Fig. 1 LCA process

3 碳排放计算方法

目前，碳足迹核算边界有4种，即“摇篮到坟墓”“摇篮到大门”“大门到大门”“大门到坟墓”^[5]。产品包装的碳足迹是产品碳足迹的关键部分，其核查主要有两种方式：其一，B2B模式下，供应商提供的“摇篮到大门”碳足迹与公司装配、运输及回收废弃的碳足迹，共同构成产品包装的总碳足迹^[9]；其二，供应商提供的“摇篮到坟墓”全生命周期碳足迹与工厂装配的能耗数据，共同构成产品包装的总碳足迹。

在进行碳排放计算前，首先要确定功能单位。功能单位是量化和比较产品或服务系统性能的基本度量单位。其次是确定系统边界，即在评价范围内包含哪几个生命周期阶段。本研究采用“摇篮到坟墓”核算方式，数据采集可分为5个阶段，分别是原材料获取阶段、生产阶段、打包整理阶段、运输阶段和回收废弃阶段^[10]。

1) 原材料获取阶段：计算主要原材料的碳排放量（ C_m ）。

$$C_m = \sum_{h=1}^n A_h F_h, \quad (1)$$

式中： A_h 为第 h 类原材料使用量； F_h 为第 h 类原材料对应的碳排放因子。

2) 生产阶段：计算能源消耗（ C_e ）和生产直接排放（ C_d ）造成的碳排放量^[11]。

$$C_e = \sum_{m=1}^n L_m \times E, \quad (2)$$

式中: L_m 为第 m 次使用能源的消耗量; E 为对应地区能源的碳排放因子。

$$C_d = \sum_{g=1}^n Q_g G_g, \quad (3)$$

式中: Q_g 为第 g 种温室气体的排放量; G_g 为第 g 种温室气体的 GWP 值。

3) 打包整理阶段: 计算主要耗材打包带的碳排放量。此阶段的碳排量计算方式与原材料获取阶段的相同, 详见式(1)。

4) 运输阶段: 计算主要运输阶段的碳排放量 (C_{ys})。

$$C_{ys} = \sum_{k=1}^n m_k l_k T_k, \quad (4)$$

式中: m_k 为运输第 k 类物料的质量; l_k 为第 k 类物料的运输距离; T_k 为运输第 k 类物料的碳排放因子。

5) 回收废弃阶段: 计算回收和废弃两种处理方式所产生的温室气体碳排放量 (E_M)。

$$E_M = E_V + E_{EOL} - RE_V, \quad (5)$$

式中: E_V 为与从自然资源中提取或生产产品所需的原材料相关的温室气体碳排放量; E_{EOL} 为含回收材料的产品中部分相关温室气体碳排放量; R 为材料的回收率, RE_V 为回收信用。

4 实例分析

EPS 因其出色的防护性能, 在烹饪机运输包装中得到广泛应用。在 EPS 包装的全生命周期中, 从原材料的获取到废弃处理阶段, 均会产生碳排放。故以家电产品烹饪机的 EPS 包装方案为例, 验证本文所提方法的正确性, 并依据评估结果进行优化设计。这对降低 EPS 包装的碳排放、提升环保效益具有重要的现实意义。

4.1 烹饪机 EPS 包装方案

某品牌烹饪机除主机设备外, 还配备有蒸锅、量杯、刮刀等标准配件。主机 3D 模型如图 2 所示, 外尺寸为 $317 \text{ mm} \times 345 \text{ mm} \times 362 \text{ mm}$, 质量为 12 kg , 而配件的最大尺寸为 $444 \text{ mm} \times 261 \text{ mm} \times 137 \text{ mm}$ 。结合经验值法和类比法, 确定产品许用脆值为 80g 。包装设计使用缓冲包装“六步法”, EPS 缓冲衬垫结构如图 3 所示。瓦楞纸箱尺寸为 $440 \text{ mm} \times 405 \text{ mm} \times 635 \text{ mm}$, 整体包装装配方案如图 4 所示。



图 2 烹饪机主机 3D 模型

Fig. 2 3D model of cooking machine host

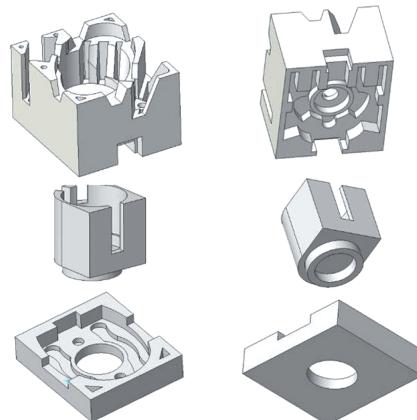


图 3 EPS 缓冲衬垫结构示意图

Fig. 3 Schematic diagram of EPS cushion pad structure

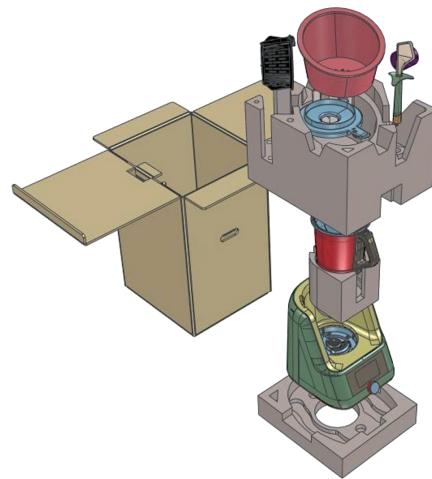


图 4 产品整体包装装配图

Fig. 4 Overall product packaging layout diagram

4.2 EPS 碳足迹核算

在包装材料 LCA 的碳足迹核算中, 整合了 CLCD-China^[12-13] (中国本土产业链数据)、Ecoinvent^[14] (国际通用数据)、ELCD (欧盟视角数据) 及 IPCC EFDB (全球排放因子) 等多元数据库,

以平衡地域适用性与权威性。需指出的是，不同数据库中能源结构的差异可能影响核算结果。例如，在Ecoinvent数据库中，欧洲清洁能源的占比相对较高，而在CLCD-China数据库中，中国以煤电为主导。为此，采用交叉验证方法，并优先考虑本土数据，以期降低系统性误差。例如，在运输和能源环节，主要采用CLCD-China数据库，而在化工原料方面，则辅以Ecoinvent数据库。EPS缓冲配件的环境影响情况如表1所示。可见，EPS缓冲配件对环境影响最大的是生产阶段，此阶段会产生大量的挥发性有机化合物。

表1 EPS的环境影响情况

Table 1 Environmental impact of EPS

应用方向	包装缓冲材料
主要原材料	聚苯乙烯粒珠、发泡剂
主要消耗能源	蒸汽、电力
主要污染物	非甲烷总烃、苯乙烯、甲苯、乙苯

4.2.1 目标和范围定义

EPS包装材料的生产过程主要包括发泡、熟化、成型、冷却脱模、烘干、检验、包装等7个主要工序^[15]，如图5所示。发泡、熟化、成型、烘干等工序均会产生非甲烷总烃、苯乙烯、甲苯、乙苯等挥发性有机化合物。产品烘干后，将进行人工外观检验，以剔除不合格品，确保只有符合质量标准的产品进入后续的包装工序。EPS包装材料的碳足迹分析是从资源开采到回收废弃，即从原材料获取、运输、产品生产、

使用到回收废弃为止^[16]，其生命周期系统边界如图6所示。定义温室气体排放核算边界时，必须将产生显著碳足迹的过程纳入考量。

碳足迹核算时，每一种原料在生产中所占的比重或在每一工序中所占的比重，根据Cut-off取舍原则来确定^[17]。具体而言，当一般材料的质量占比小于1%，或含有稀有贵重材料或高纯度材料的质量占比小于0.1%时，可以不考虑这类材料的上游生产数据；总忽略材料的质量占比要在5%以内；生产设备、工厂、生活设施等都可忽略。所有原材料及能量的消耗均与上游数据存在关联性，因而对上游部分数据进行了近似替代。EPS碳足迹分析时，忽略了0.1%的分散剂羟基磷酸钙(hydroxyapatite, HAP)、0.19%的引发剂过氧化物、0.349%的阻燃剂过氧化二异苯丙、0.039%的稳定剂磷酸氢二钠，总忽略物料的质量占比为0.678%。

4.2.2 生命周期清单分析

对产品生命周期的GWP值进行分析。功能单位为生产1 kg包装用缓冲材料EPS。本研究对供应商一年的生产统计资料进行实地评估。能源和原材料的消耗数据是从企业的实际生产统计数据中选取，而环保数据的获取则采用了双重方法：一方面，从相关的环境监测报告中直接获取；另一方面，通过污染物的污染系数与物质平衡公式进行计算得出。数据采集分为5个阶段，分别是原材料获取阶段、生产阶段、

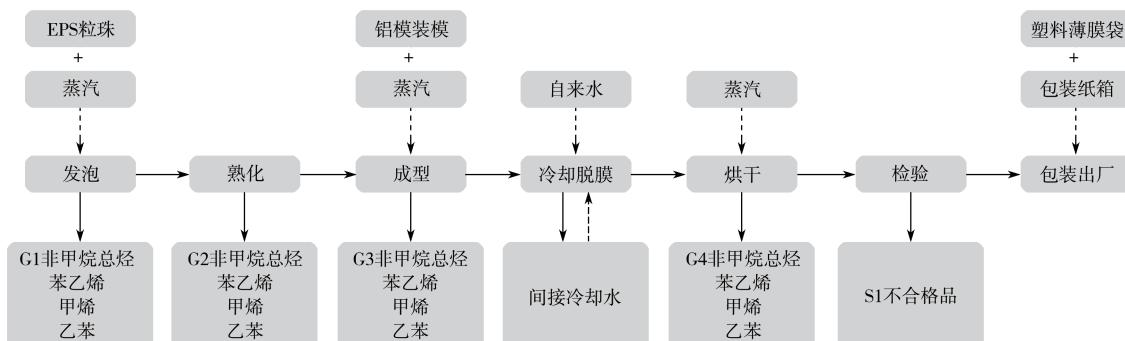


图5 EPS生产工艺流程图

Fig. 5 EPS production process flow diagram

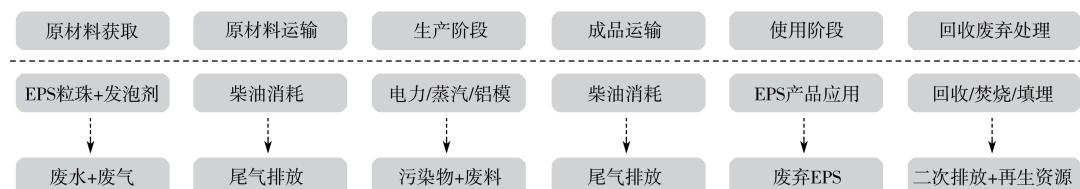


图6 EPS 生命周期系统边界

Fig. 6 EPS life cycle system boundary

打包整理阶段、运输阶段和回收废弃阶段。

1) 原材料获取阶段: 计算 EPS 粒珠、起泡剂等主要原材料的碳排放量。

每功能单位需要 1.04 kg 聚苯乙烯发泡粒珠和极少量起泡剂、稳定剂等。聚苯乙烯发泡粒珠的碳排放因子为 3.4759 kg CO₂eq/kg。按式(1)计算原材料获取阶段的碳排放量, 为 3.6149 kg CO₂eq。

2) 生产阶段: 计算能源消耗和生产直接造成的碳排放量。

EPS 加热成型温度约为 110~120 °C, 远低于其分解温度 240 °C。因此在 EPS 粒子中, 未参与聚合反应的单体及从聚合物中分解出来的单体可挥发至空气中, 从而形成有机废气, 以非甲烷总烃计。具体污染物排放如表 2 所示。

表 2 现场污染物排放汇总表

Table 2 Summary of on-site pollutant releases

挥发性有机化合物	碳排放量/g
非甲烷总烃	0.1370
苯乙烯	0.0029
甲苯	0.0024
乙苯	0.0031

EPS 粒子在发泡、熟化、成型、烘干的情况下, 功能单位所需要消耗的蒸汽为 5.56 MJ, 电网供电为 1.92 kW·h, 华东地区对应的碳排放因子分别为 0.0766 kg CO₂eq/MJ 和 0.8313 kg CO₂eq/(kW·h)。按式(2)和式(3)计算生产阶段的碳排放量, 为 2.0219 kg CO₂eq。

3) 打包整理阶段: 计算主要耗材打包带的碳排放量。

功能单位 EPS 打包整理需要 PET 打包带 0.001 kg、瓦楞纸板 0.02 kg、PE 塑料薄膜袋 0.001 kg, 其

对应的碳排放因子分别为 4.03, 7.10, 8.21 kg CO₂eq/kg。

按式(1)计算打包整理阶段的碳排放量, 为 0.1542 kg CO₂eq。

4) 运输阶段: 计算 4 个主要运输阶段的碳排放量。

4 个主要运输阶段为: 阶段 1, 原材料的供应运输; 阶段 2, EPS 生产后, 以 B2B 模式运输至甲方公司; 阶段 3, 以 B2C 模式将终端产品运输至消费者; 阶段 4, 消费者使用完毕后, 产品以生活垃圾处理或回收方式结束其生命周期。其中, 运输阶段 1 和 2 为第一手数据, 运输阶段 3 和 4 为统计调查数据。在所有运输阶段, 均使用汽油货车进行公路运输, 碳排放因子为 0.7192 kg CO₂eq/(t·km)。按式(4)计算运输阶段的碳排量, 为 0.5754 kg CO₂eq。

5) 回收废弃阶段: 计算由两种处理方式产生的碳排放量。

调查数据显示, 仅有 16% 的废弃 EPS 被回收利用, 经过一系列工艺制成 EPS 发泡粒珠, 其余 84% 会被焚烧和填埋处理。在 20% 的 EPS 回收料与原料共混的情况下, 材料性能不会出现显著变化, 并显示出良好的稳定性。回收过程中会再次消耗电能 1.6 kW·h, 并添加耗材如稳定剂等, 但材料回收后可抵消一部分碳排放。回收废弃阶段的碳排放量^[18]按式(5)计算, 焚烧垃圾的碳排放因子为 0.1243 kg CO₂eq/kg, 回收的碳排放量为 1.4345 kg CO₂eq, 材料回收率为 16%, 各阶段碳排放量之和为 6.3665 kg CO₂eq。可得本发泡 EPS 材料的碳排放总量为 6.7824 kg CO₂eq。

根据 EPS 的生命周期清单分析结果, 构建 EPS 碳足迹模型^[19], 各类背景数据的代表性描述如表 3 所示。最终, 利用 eBalance 软件核算功能单位 EPS 的 GWP 值。

表 3 EPS 背景数据汇总

Table 3 EPS background data summary

过程	名称	碳排放因子	数量	碳排放量 /kg CO ₂ eq
原材料获取阶段	EPS 粒珠 + 发泡剂	3.4759 kg CO ₂ eq/kg	1.0400 kg	3.6149
生产阶段	商品蒸汽	0.0766 kg CO ₂ eq/MJ	5.56 MJ	0.4259
	电网供电	0.8313 kg CO ₂ eq/(kW·h)	1.92 kW·h	1.5961
	直接排放	cut-off	0.0002 kg	cut-off
打包整理阶段	PET 打包带	4.0300 kg CO ₂ eq/kg	0.0010 kg	0.0040
	瓦楞纸板	7.1000 kg CO ₂ eq/kg	0.0200 kg	0.1420
	PE 塑料薄膜袋	8.2100 kg CO ₂ eq/kg	0.0010 kg	0.0082
运输阶段阶段	货车公路运输	0.7192 kg CO ₂ eq/(t·km)	0.8 t·km	0.5754
	回收用电	0.8313 kg CO ₂ eq/(kW·h)	1.60 kW·h	1.3301
回收废弃阶段	焚烧垃圾处理	0.1243 kg CO ₂ eq/kg	0.8400 kg	0.1044
	回收料碳减排	-6.3665 kg CO ₂ eq/kg	0.1600 kg	-1.0186

4.2.3 EPS 包装碳足迹结果分析

使用 ISO 24044 方法体系对产品生命周期的 GWP 进行分析^[20]。基于 EPS 的生命周期过程，即从原材料获取、运输、产品生产、产品出厂到回收废弃为止，利用 eBalance 软件核算功能单位 EPS 的 GWP。EPS 的生命周期影响评价结果如表 4 所示。

表 4 EPS 产品碳足迹

Table 4 Carbon footprint of EPS products kg CO₂eq

LCA 碳足迹	原材料获取阶段	生产阶段	打包整理阶段	运输阶段	回收废弃阶段
6.7824	3.6149	2.0220	0.1542	0.5754	0.4159

EPS 产品各阶段对全球变暖的贡献情况如图 7 所示。在 EPS 发泡成型的系统边界内，碳排放总量为 6.7824 kg CO₂eq。首先，原材料获取阶段是主要的碳排放源（占 53.30%），这主要归因于原材料生产中石油、原煤和天然气等化石能源的直接燃烧所释放的 CO₂；其次，生产阶段中发泡所需电力对全球变暖的

表 5 包装材料使用量与碳足迹
Table 5 Usage of packaging materials and carbon emissions

部件材料	规 格	质量/g	碳排放量因子 / (kg CO ₂ eq/kg)	LCA 碳足迹 / (kg CO ₂ eq)
EPS 下泡沫	8 832 130 mm ³	177		
EPS 中泡沫	2 781 143 mm ³	56	6.7824	4.9037
EPS 上泡沫	24 482 344 mm ³	490		
瓦楞外箱	1 691 894 mm ²	1746	1.6050	2.8023
PE 包装袋	5 个	80	3.2400	0.2592
热塑膜	138 714 mm ³	125	3.6000	0.4500

4.3 EPS 低碳设计策略

为减少 EPS 包装的碳足迹，本研究从其生命周期的各个阶段出发，采取多维度协同策略，提出低碳设计策略。在原材料获取阶段，优化能源结构，逐步降低 EPS 原材料（如苯乙烯）生产过程中化石能源（石油、煤炭）的使用比例，引入太阳能、风能等可再生能源，以减少直接碳排放量。国际化工巨头巴斯夫开发了生物基苯乙烯生产工艺，通过可再生原料（如生物质）替代石油基原料，显著降低了 EPS 上游材料的碳足迹^[21]。在设计阶段，秉持轻量化的设计理念，通过结构优化减少 EPS 用量，例如采用蜂窝结构或加强筋设计，在保证防护性能的前提下降低材料消耗。美的集团针对空调产品开发了蜂窝结构 EPS 包装。通过优化内部支撑设计，材料用量减少 15%，同时保持同等防护性能。据测算，单台空调包装碳足

贡献显著（占 29.81%）；最后，运输阶段对全球变暖的贡献相对较小（占 8.48%）。

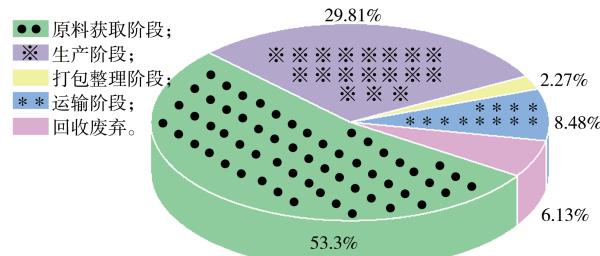


图 7 EPS 产品各阶段对全球变暖的贡献情况
Fig. 7 Contribution of EPS products to global warming at each stage

本研究首先基于供应商提供的“摇篮到坟墓”生命周期数据，对 EPS 包装的 LCA 碳足迹进行了核查，并通过相同的方法计算得到其他包装材料的碳排放量因子。在此基础上，结合已确定的包装方案，进一步核算了各类包装材料的使用量，最终得出其 LCA 碳足迹为 8.4152 kg CO₂eq。具体核算结果如表 5 所示。

迹降低约 1.2 kg CO₂eq^[22]。

目前，仅 16% 的 EPS 被回收利用。若能显著提高其回收率，例如提高至 30% 甚至更高，有望减少 20% 左右的碳排放。这需要建设高效回收网络，完善 EPS 回收基础设施，设立社区回收点与企业逆向物流合作机制，以提升回收便利性。产业链方面，可建立“生产 – 使用 – 回收”闭环体系，推动家电企业、包装供应商与回收企业之间的合作，以实现资源的循环利用。

5 结语

本研究基于 LCA 理论，对家电产品烹饪机的 EPS 包装方案进行了全面的碳足迹核算。通过对原材料获取、生产、打包整理、运输和回收废弃等阶

段的细致分析, 明确了该 EPS 包装方案的碳足迹情况。核算结果显示, EPS 的碳排放量总量为 6.7824 kg CO₂eq, 烹饪机 EPS 方案的 LCA 碳足迹为 8.4152 kg CO₂eq。在整个生命周期中, 原材料获取阶段对碳足迹的贡献最为显著。因此, 优化原材料生产环节的能源结构, 提高清洁能源的使用比例, 将是降低 EPS 包装碳足迹的关键方向。研究还发现, 提高 EPS 包装回收率能够显著地减少碳排放。此外, 实施低碳 EPS 包装设计策略, 对于减少 EPS 包装材料在回收废弃阶段的碳排放量具有决定性作用。因此, 家电行业应致力于通过改进生产工艺、优化包装方案以及加强回收利用等策略, 以实现绿色可持续发展, 达成碳达峰碳中和目标。

参考文献:

- [1] 谢明辉, 满贺诚, 段华波, 等. 生命周期影响评价方法及本地化研究进展 [J]. 环境工程技术学报, 2022, 12(6): 2148–2156.
- [2] VOGTLÄNDER J G, VAN DER VELDEN N M, VAN DER LUGT P. Carbon Sequestration in LCA, a Proposal for a New Approach Based on the Global Carbon Cycle; Cases on Wood and on Bamboo[J]. The International Journal of Life Cycle Assessment, 2014, 19(1): 13–23.
- [3] 李曾婷. 中国家用电器协会双碳工作组(CHEAA WG2)第五次会在上海召开 [J]. 电器, 2023(12): 44–45.
- [4] 秦云, 肖风劲, 於玲, 等. 碳中和评估与预测预估方法研究进展 [J]. 中国环境管理, 2024, 16(1): 63–72.
- [5] 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.
- [6] WIEDMANN T, MINX J. A Definition of “Carbon Footprint” [J]. Journal of the Royal Society of Medicine, 2009, 92(4): 193–195.
- [7] 童庆蒙, 沈雪, 张露, 等. 基于生命周期评价法的碳足迹核算体系: 国际标准与实践 [J]. 华中农业大学学报(社会科学版), 2018(1): 46–57.
- [8] International Organization for Standardization. Environmental Management—Life Cycle Assessment—Principles and Framework: ISO 14040[S]. Geneva: IOS, 2006: 1–2.
- [9] 江舜成, 张杰, 朱艳, 等. 基于生命周期评价的汽车车身冲压件的碳排放研究 [J]. 汽车科技, 2025(2): 14–18.
- [10] 李甫印, 张暖, 林勤保, 等. 基于生命周期评价的纸浆模塑天地盖礼盒环境影响分析 [J]. 包装学报, 2024, 16(5): 43–51.
- [11] 沈明辰, 王晓, 殷旅江, 等. 基于 LCA 理论的汽车零部件包装箱“以塑代木”对比研究 [J]. 包装工程, 2024, 45(17): 234–240.
- [12] 刘冠彤, 余跃, 曾运航, 等. 生命周期评价法评估皮革复鞣剂染整过程的环境影响 [J]. 皮革科学与工程, 2022, 32(5): 6–13.
- [13] 霍李江, 赵昱. 鸡蛋包装生产工艺的生命周期评价 [J]. 包装学报, 2021, 13(3): 37–43.
- [14] FITZGERALD D, BOURGAULT G, VADENBO C, et al. Documentation of Changes Implemented in the Ecoinvent Database v3.10[EB/OL]. [2025-01-04]. <https://19913970.fs1.hubspotusercontent-na1.net/hubfs/19913970/Knowledge%20Base/Database/Releases/Change%20Report%20v3.10%20-%2020231214.pdf>.
- [15] SILVA N, MOLINA-BESCH K. Replacing Plastic with Corrugated Cardboard: A Carbon Footprint Analysis of Disposable Packaging in a B2B Global Supply Chain: A Case Study[J]. Resources, Conservation and Recycling, 2023, 191: 106871.
- [16] 陈丽娇, 孙万意, 迟晓光, 等. 包装用免胶型瓦楞纸箱的碳排放比较分析 [J]. 科技与创新, 2023(18): 5–9.
- [17] 任姝珩, 张媛, 朱磊, 等. 循环包装箱全生命周期碳足迹计算方法研究 [J]. 包装工程, 2023, 44(13): 245–252.
- [18] LIANG Z Y, DENG H J, XIE H Y, et al. Rethinking the Paper Product Carbon Footprint Accounting Standard from a Life-Cycle Perspective[J]. Journal of Cleaner Production, 2023, 393: 136352.
- [19] 胡云霞. 基于产品生命周期的 JX 纸业环境成本核算优化方案及应用研究 [D]. 贵阳: 贵州财经大学, 2022.
- [20] 林炜, 杨乐, 王春华, 等. 一种皮革产品碳足迹的核算方法 [J]. 皮革制作与环保科技, 2023(24): 4.
- [21] BASF. Accelerating Transformation: BASF Sustainability Report 2022[R]. Ludwigshafen: BASF, 2022: 26–29.
- [22] 美的集团股份有限公司. 美的集团 2023 年环境、社会及管治(ESG)报告[R]. 佛山: 美的集团股份有限公司, 2023: 27–44.

(责任编辑: 邓彬)

Life Cycle Assessment-Based Carbon Footprint Accounting and Analysis of EPS Packaging for Home Appliances

YANG Xuxia^a, WANG Haijun^a, LI Zhiqiang^{a,b}, WANG Jie^a

(a. College of Bioresources Chemical & Materials Engineering; b. National Experimental Teaching Demonstration Center for Light Chemistry Engineering, Shaanxi University of Science & Technology, Xi'an 710021, China)

Abstract: To advance the low-carbon emission reduction process in the home appliance industry, a carbon footprint assessment was conducted on polystyrene (EPS) packaging used for home appliances, thereby exploring optimization strategies for EPS packaging solutions. Based on life cycle assessment (LCA) theory and employing life cycle inventory analysis, a systematic statistics and analysis was performed on carbon emissions across EPS stages including raw material acquisition, production, packaging and sorting, transportation, and recycling/disposal. Research findings indicate that the total carbon emission for EPS packaging of cooking appliances is 6.7824 kg CO₂eq, with an LCA carbon footprint of 8.4152 kg CO₂eq. Further analysis reveals that the raw material production stage contributes 53.3% to the global warming potential within the EPS packaging carbon footprint, making this phase critical for achieving carbon reduction. Optimizing the energy structure, significantly improving EPS recycling rates, and refining packaging designs represent vital pathways toward achieving carbon peak and carbon neutrality goals.

Keywords: EPS; life cycle assessment; carbon footprint; cooking appliance; packaging solution; recycling rate