

基于 LCA 理论的汽车零部件包装箱“以塑代木”对比研究

沈明辰, 王晓*, 殷旅江*, 张驰, 王彦兆
(湖北汽车工业学院, 湖北 十堰 442002)

摘要: **目的** 旨在解决汽车零部件包装中一个长期存在的问题, 即“以塑代木”还是“以木代塑”。通过评估聚丙烯可循环包装箱与铁木箱在整个生命周期中的碳排放量, 探讨使用聚丙烯包装箱替代传统木箱的环保价值。**方法** 研究采用生命周期评价 (LCA) 方法以铁木箱为例进行碳足迹研究, 考虑从原材料获取、生产、使用到废弃处理等各个阶段的碳排放量。通过这种方法, 可以更准确地评估包装箱在整个生命周期中的环保价值, 并为未来的包装箱选择提供科学依据。**结果** 研究发现, 在整个生命周期中, 聚丙烯可循环包装箱的碳排放量明显低于铁木箱。具体数据显示, 铁木箱碳排放量约为 571.265 kg, 而聚丙烯包装箱约为铁木箱碳排放的四分之一。**结论** 根据上述实验结果得出结论, 聚丙烯可循环包装箱在减少碳排放方面具有显著效果, 因此, 在汽车零部件包装材料选择上, “以塑代木”是值得推广的。这一发现为包装行业提供了重要的参考, 有助于推动更加可持续的包装解决方案。

关键词: 铁木箱; 全生命周期; 碳足迹; 汽车零部件包装箱

中图分类号: TB485.3

文献标志码: A

文章编号: 1001-3563(2024)17-0234-07

DOI: 10.19554/j.cnki.1001-3563.2024.17.028

Comparative Study on Carbon Footprint of Ironwood Boxes and Polypropylene Recycled Packaging Boxes Throughout Their Life Cycle

SHEN Mingchen, WANG Xiao*, YIN Lujiang*, ZHANG Chi, WANG Yanzhao

(Hubei University of Automotive Technology, Hubei Shiyan 442002, China)

ABSTRACT: The work aims to evaluate the carbon emissions of polypropylene recyclable packaging boxes and ironwood boxes across their entire life cycle, and investigate the environmental merits of polypropylene packaging boxes in comparison to traditional wooden boxes, so as to address a long-standing issue in the packaging of automotive components: "using plastics instead of wood" or "using wood instead of plastics". The Life Cycle Assessment (LCA) methodology was adopted to conduct a carbon footprint analysis with ironwood boxes as examples. It took into account the carbon emissions generated at each stage, from raw material acquisition, production, usage, to waste disposal. Through this rigorous approach, the environmental impact of packaging boxes throughout their life cycle could be accurately assessed to furnish a scientific rationale for choosing of future packaging materials. The findings revealed that polypropylene recyclable packaging boxes exhibited significantly lower carbon emissions throughout their life cycle compared with ironwood boxes. Specifically, ironwood boxes emitted approximately 571.265 kg, whereas polypropylene packaging boxes accounted for roughly a quarter of this figure. Based on these compelling results, it is evident that polypropylene recyclable packaging boxes effectively contribute to carbon emission reduction. Therefore, in the context of automotive component packaging, the adoption of "using plastics instead of wood" emerges as a viable and

收稿日期: 2024-05-20

基金项目: 国家自然科学基金 (52175490); 国家社会科学基金一般项目 (17BGL238); 湖北省高等学校哲学社会科学重大项目 (23ZD241); 湖北省科技厅重点研发课题助企纾困重大项目 (KJCXQS2022000225)

*通信作者

commendable option. This discovery serves as a valuable reference for the packaging industry, fostering the development of more sustainable packaging alternatives.

KEY WORDS: ironwood box; whole life cycle; carbon footprint; packaging box of automotive components

随着全球对环境保护意识的日益增强,以及中国《“十四五”节能减排综合工作方案》的深入推进,汽车零部件行业的包装材料选择成为了实现绿色制造和可持续发展的重要议题。该方案明确提出了加快推广标准化物流周转箱和全面推广绿色快递包装的目标,为行业指明了绿色转型的方向^[1]。在汽车零部件的集合发运过程中,包装材料的选择至关重要。目前,铁木箱和聚丙烯可循环包装箱是 2 种主要的包装材料。为了响应国家政策并满足企业实际需求,本文选择铁木箱和聚丙烯可循环包装箱作为研究对象,通过计算及对比它们从“摇篮”到“坟墓”的全生命周期碳足迹,深入分析其环境友好程度,以期“以塑代木”还是“以木代塑”的选择提供科学依据^[2]。碳足迹的概念最早是由 20 世纪 90 年代初期,英国的麦克斯教授提出,并将其定义为个人、组织或活动产生的温室气体排放的数量,开展碳足迹评价是企业掌握所生产产品对环境产生影响的重要手段,本文选择全球变暖潜力(Global Warming Potential, GWP)作为环境影响类别评估指标,其结果用二氧化碳当量(CO₂eq)表示^[3]。LCA 理论作为一种系统的环境管理工具,能够系统地分析和评估产品在其整个生命周期内的环境影响,其主要包括 4 个阶段:目标和范围定义阶段、生命周期清单分析、生命周期影响评价和结果解释阶段。本文基于产品全生命周期评价(Life Cycle Assessment, LCA)理论,在碳达峰、碳中和的背景下,探究聚丙烯循环包装箱和铁木箱的环境影响。

Guo 等^[4]对聚丙烯快递箱和瓦楞纸箱情形实际的案例分析,得出使用 2 次以上后,PP-EB 的综合指数低于传统瓦楞纸箱。任姝珩等^[5]给出了聚丙烯循环包装箱的计算模型和 LCA 结果与分析,得出了 1 m² 循环包装箱使用近 50 次全生命周期碳排放量为 9.854 1 kg 的结果,说明循环包装的环保效益较高。林华敏等^[6]用生命周期评价方法研究框架木箱,分析其碳足迹,得出原材料生产阶段碳排放量占比达到 67%的结论,生产加工及物流阶段占比达到 31%,故得出应对原材料生产及运输阶段采取碳减排措施的结论。巩桂芬^[7]对比钢边箱和传统木箱对环境的影响,得出钢边箱优于传统木箱的结论。王家等^[8]计算了聚丙烯原油获取、运输阶段、产品生产阶段的碳排放因子,并提供计算方法和对应计算系数,对聚丙烯产品碳足迹进行了全过程的计算。曹华林等^[9]通过研究和分析,做出了 LCA 与低碳约束的家具设计模型,列出木制品的功能和结构碳足迹公式,建立了完整的全生命周期评价模型。

上述研究主要对聚丙烯循环包装箱的全生命周

期碳足迹排放进行测度,对汽车零部件广泛使用的铁木箱的碳排放测算的相关研究较少。然而,复合塑料模板和包装材料也面临一些挑战,如初期投入成本较高、回收处理的技术要求高等。这些问题使得“以塑代木”在推广过程中仍需克服一定的障碍。此外,如何平衡塑料和木材的使用,确保在环境和经济效益之间取得最佳平衡,也是目前研究和实践中的重点和难点。

为此,在汽车零部件企业实地调研的基础上,本文基于(LCA)全生命周期下铁木箱的碳足迹计算方法,引用现有的聚丙烯相关数据,采用碳足迹计算模型对比同一尺寸下的聚丙烯循环包装箱的全生命周期碳排放量。

1 铁木箱全生命周期环境影响评价分析

1.1 目标与范围

计算铁木箱全生命周期的碳排放,将其与同尺寸下聚丙烯可循环包装箱的碳排放进行对比,分析其环境友好程度。核算范围是从“摇篮到坟墓”,本文所选择的铁木箱尺寸为 2 280 mm×1 600 mm×1 100 mm,质量为(109±3) kg,以此规格的单个铁木箱作为基本计算单元。根据企业中铁木箱实际使用情况,其产品功能主要体现在运输过程中,多数为一次性使用。

1.2 系统边界

系统边界指在生命周期评价中确定哪些过程和活动将被包括在研究范围内。系统边界的合理确定可以确保 LCA 结果的全面性和可靠性。铁木箱全生命周期系统边界包括铁木箱的原材料(胶合板、矩形铁管、铁钉)输入、生产加工、运输使用、废弃处理等各阶段^[10]。文中基于生命周期方法与碳足迹计算,生命周期指从自然资源取得或产生的原材料到最终处置,有关该产品系统中连续与互相联结的过程。铁木箱的系统边界见图 1。

1) 原材料输入。铁木箱作为一种特殊的包装或储存容器,其原材料输入涉及到 4 个部分:胶合板、方形钢管、铁钉和螺栓。在选择原材料时,需要综合考虑价格、质量、供应稳定性等因素,以控制成本并保持竞争力。

2) 生产加工。胶合板制作过程碳排放^[11-12];钢管制作过程的碳排放^[13];铁钉、螺栓考虑钻孔产生的碳排放。

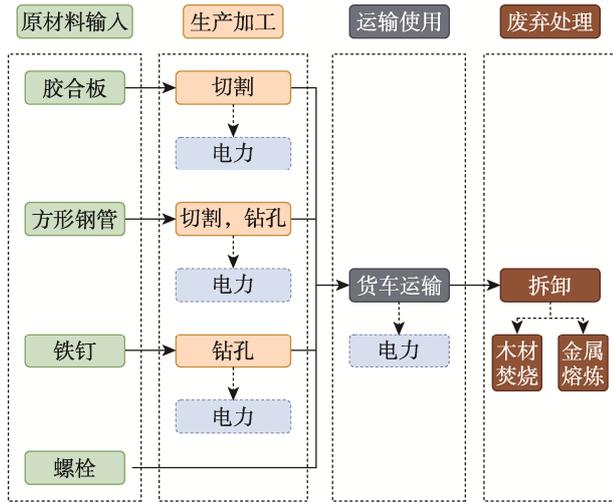


图1 系统边界
Fig.1 System boundary

3) 运输使用。组装为成品的铁木箱，根据订单需求，装车运输，本文默认由 10 t 柴油货车运输，排放因子为 0.162 kg/(t·km)。

4) 废弃处理。本文仅考虑一种报废处理方式，胶合板采用焚烧的报废方法，钢管、铁钉和螺栓，均采用熔炼的方式报废。

2 铁木箱全生命周期清单分析

清单分析是进行相关数据收集的过程，包括对各阶段材料、能源的投入量等数据进行分类统计。铁木箱的使用比较广泛并且有标准化的尺寸，但不同环节的碳排放量有较大差异，因此我国在铁木箱的全生命周期活动的碳排放量测算研究较少，构建该计算模型的相关数据不够健全。故本文根据数据库资料与文献^[14-23]，对各个环节原辅材料的碳排放因子进行查询，从而计算碳排放量。

2.1 数据类型

2.1.1 生产阶段

本文选取 D 公司汽车零部件包装部门，国际标准铁木箱作为标准，搜集并测算铁木箱的尺寸数据等基本信息。默认就近采购原料，原材料生产厂家主要为胶合板生产厂家，方钢生产厂家。

铁木箱生产阶段所需工艺步骤经企业实地考察，工业器具能源消耗电力。主要使用方面在于胶合板的切割，铁木箱盖板螺丝，方钢的焊接、钻孔、切割。铁钉与铁木箱的主要构成材料（如胶合板、钢管、螺栓等）相比，铁钉的质量占比极低，由于其微小贡献度，选择不将铁钉的碳排放纳入计算范围。

2.1.2 使用阶段

铁木箱的使用阶段，根据企业实际情况，本研究默认采用柴油货车运输，不考虑火车及货运轮船的运输使用方式。

2.1.3 废弃阶段

铁木箱的废弃回收主要分为 2 个方面，第一方面是胶合板的废弃回收，由于汽车零部件的特殊性，胶合板可能会产生渗透性油污，因此不采取循环回收策略，转而采取焚烧处理。第二方面是钢管的回收，本文采取熔炼再生的方式进行回收利用^[24]。

2.2 标箱数据

本文所选择进行对比的铁木箱和聚丙烯可循环包装箱的基本信息：铁木箱尺寸为 2 280 mm×1 600 mm×1 100 mm，质量为 109.1 kg；聚丙烯可循环包装箱尺寸 2 280 mm×1 600 mm×1 100 mm，质量为 36 kg。标箱数据源于企业实地调研，对 10 个铁木箱各组成部分及成箱进行实际测量，取测量平均数作为标箱质量。详细标箱数据见表 1。

表 1 标准铁木箱数据
Tab.1 Data of standard ironwood box

材料类别	材料规格/cm	长度或尺寸/mm	数量/根	每根质量/kg
地板支撑钢梁	6×8	1 600	4	4.2
	2×4	2 240	5	2.5
	2×4	1 600	2	1.8
地板木板	11	2 280×1 600	1	13
	2×4	2 280	4	2.7
边板支撑钢梁	2×4	920	18	0.95
	4	980×2 280	2	4.5
边板木板	4	980×1 600	2	3.7
	2×4	2 200	4	2.3
盖板钢梁	2×4	1 600	2	1.8
	4	2 280×1 600	1	4.7
盖板木板	4	2 280×1 600	1	4.7
连接螺栓		110×12	28	0.05
标箱尺寸		2 280×1 600×1 100		109.1

3 碳排放计算模型

碳足迹是温室气体核算方法的一种,指个人、企业、国家或产品等实体的所有活动所引起的温室气体或二氧化碳排放量,既包括制造、供暖和运输过程中化石燃料燃烧产生的直接排放,也包括商品服务所消耗电力产生的间接排放^[25]。碳足迹通常以二氧化碳当量为单位,衡量实体对温室效应的影响,为低碳减排提供基准。本研究采用任姝珩等^[5]提出的综合性碳排放计算模型来分析铁木箱的碳足迹,在此基础上加入了单次使用的铁木箱包装作为约束条件。根据上文已确定的系统边界,对铁木箱的各阶段碳排放进行计算,从而得出铁木箱各个阶段碳排放的精确数据。各个阶段的计算方法如表 2 所示,铁木箱的总计碳排放量是所有阶段碳排放量的总和。

3.1 模型假设

假设 1: 本文仅考虑铁木箱生产、使用、废弃阶段所产生的碳排放。

假设 2: 本文计算运输过程中产生的碳排放均是在货车装载一个铁木箱的情况下且默认由 10 t 柴油货车运输,排放因子为 0.162 kg/(t·km)。该碳排放因子数据来自 CLCD 中国生命周期基础数据库。

3.2 碳排放计算模型分析

1) 铁木箱原材料阶段碳排放 C_y , 见式 (8)。

$$C_y = \sum_{f=1}^n R_f S_f \quad (8)$$

式中: R_f 为 f 类原材料使用量; S_f 为 f 类原材料所对应的碳排放因子。

2) 电力能源碳排放 C_e , 见式 (9)。经过查询湖北地区电力碳排放因子为 0.316 kg/(kW·h)。

$$C_e = \sum_x E_x B \quad (9)$$

式中: E_x 为第 x 次使用电力能源的消耗量; B 为湖北地区电力碳排放因子,表示每单位能源消耗所产生的 CO_2 排放量。

3) 转运阶段碳排放 C_{zy} , 见式 (10)。

$$C_{zy} = \sum_i^n Q_i D_i P_i \quad (10)$$

式中: Q_i 为第 i 种输入物料的质量, kg; D_i 为第 i 种输入物料运输距离, km; P_i 为第 i 种输入物料的运输方式下,单位质量运输距离的碳排放因子, kg/(t·km)。

由于在原材料的使用阶段,胶合板及钢管的转运距离各不相同,本文假设原材料在十堰市内进行采购,根据路程评估,胶合板原材料转运距离为 3.4 km,钢管原材料转运距离为 5.3 km。在铁木箱成品转运阶段本研究假定发往武汉市汽车 4S 店,路程查询为 498 km。

4) 废弃阶段碳排放 C_o 。木材进行焚烧,焚烧产生的碳排放本文参考 IPCC 温室气体排放的估算方法,见式 (11)。

$$C_o = \frac{44}{12} \sum_i (m_i \times d_i \times C_i \times F_i \times O_i) \quad (11)$$

式中: m_i 为被焚烧 i 类物质的质量; d_i 为被焚烧 i 类物质的干物质含量占比, %; C_i 为干物质中的碳含量占比, %; F_i 为总碳中的化石碳含量占比, %; O_i 为氧化系数, %。

根据已确定的系统边界,对铁木箱的各阶段碳排放进行计算,从而得出铁木箱各个阶段碳排放的精确数据,见表 3。

表 2 铁木箱碳排放计算模型
Tab.2 Carbon emission calculation model of ironwood box

关键环节	环节要素	要素细分	碳排放来源	符号设定	计算公式	序号
生产阶段	铁木箱原材料的生产	胶合板, 矩形铁管, 铁钉, 螺栓的生产	生产	T_1	$\sum_{f=1}^n R_f S_f$	(1)
			转运 (柴油)	T_2	$\sum_i^n Q_i D_i P_i$	(2)
			电力	T_3	$\sum_x E_x B$	(3)
	铁木箱的组装	胶合板, 矩形铁管的切割	电力	T_4	$\sum_x E_x B$	(4)
使用阶段	铁木箱的使用	货车运输	柴油	T_5	$\sum_i^n Q_i D_i P_i$	(5)
废弃阶段	木材, 铁废弃处理	木材焚烧, 金属熔炼	焚烧	T_6	$\frac{44}{12} \sum_i (m_i \times d_i \times C_i \times F_i \times O_i)$	(6)
			熔炼	T_7	$\sum_{f=1}^n R_f S_f$	(7)

表3 铁木箱单元过程碳排放贡献
Tab.3 Carbon emission contribution of ironwood box unit process

碳排放阶段	碳排放来源	单位	消耗量	碳排放量/kg	碳贡献/%	计算说明
生产阶段	胶合板	m ³	0.085 139 2	41.463	7.26	
	钢管	t	0.073 6	231.84	40.58	
	连接螺栓	t	0.001 4	4.51	0.79	
使用阶段	胶合板转运(原材料)	km	3.4	8.771	1.54	默认由 10 t 柴油货车运输, 排放因子为 0.162 kg/(t·km)
	钢管转运(原材料)	km	5.3			
	胶合板转运(成品箱)	km	498			
	钢管转运(成品箱)	km	498			
废弃阶段	木材焚烧	kg	34.1	47.013	8.23	
	钢管熔炼	t	0.075	236.35	41.37	
电力能源	钻孔机	kW·h	0.039	1.318	0.23	碳排放因子为 0.316 kg/(kW·h)
	钢管锯	kW·h	0.203			
	电焊	kW·h	3.253			
	开料据	kW·h	0.661			
	电钻	kW·h	0.014			
总碳排放量				571.265		

注: 碳排放因子数据来自 CLCD 数据库、文献[14-23]、标准^[26]。

4 铁木箱全生命周期影响评价与结果讨论

在进行清单分析与模型计算结束之后,对铁木箱不同阶段的能源消耗,材料消耗及碳排放量有详细的结果。通过对铁木箱的全生命周期碳排放计算发现,其碳排放为 571.265 kg。由图 2 可知,钢材的制造与回收在铁木箱各阶段碳排放中占比最高,是影响铁木箱碳排放的关键系数。铁木箱的原材料在生产设计、废弃处理方面还有较大的改进空间,为了使对比更加精确,根据任姝珩等^[5]的研究,以国际标准尺寸的铁木箱作为对照,将聚丙烯可循环包装箱的碳排放量进行换算,以确保在同等尺寸条件下进行对比。可得同尺寸聚丙烯可循环包装箱使用近 50 次全生命周期碳排放仅为 156.01 kg。

经过换算得出对照组在相同尺寸下的碳排放数据,对比分析聚丙烯可循环包装箱和铁木箱在生产、使用及废弃 3 个阶段的碳排放,以评估其环境影响。

在生产阶段,聚丙烯可循环包装箱的碳排放显著低于铁木箱。具体数据表明,聚丙烯可循环包装箱的碳排放为 48.76 kg,而铁木箱为 277.831 kg。这表明聚丙烯可循环包装箱在生产过程中碳足迹较低,仅为铁木箱的 17.55%。

在使用阶段,聚丙烯可循环包装箱的碳排放为 98.73 kg,高于铁木箱的 8.771 kg。这主要是因为聚丙烯材料在使用过程中可以多次循环使用,需要进行更多的清洁和维护,从而导致能源消耗增加,进而碳排放量也显著增加。为使对比更加合理,根据企业实际使用情

况,铁木箱的使用寿命为 1 次,聚丙烯可循环包装箱使用寿命约为 50 次,可以得出聚丙烯可循环包装箱单次循环碳排放仅为 1.975 kg,是铁木箱的 22.51%。

废弃阶段的碳排放分析显示,聚丙烯可循环包装箱的碳排放量为 8.52 kg,而铁木箱则为 283.363 kg。聚丙烯可循环包装箱在废弃阶段的碳排放量仅为铁木箱的 3%,显示出其在生命周期末端的碳足迹较低,具有较高的环境优势。

综上所述,聚丙烯可循环包装箱在生产和废弃阶段的碳排放量均显著低于铁木箱,使用阶段设计对照组试验后单次循环碳排放同样远低于铁木箱。

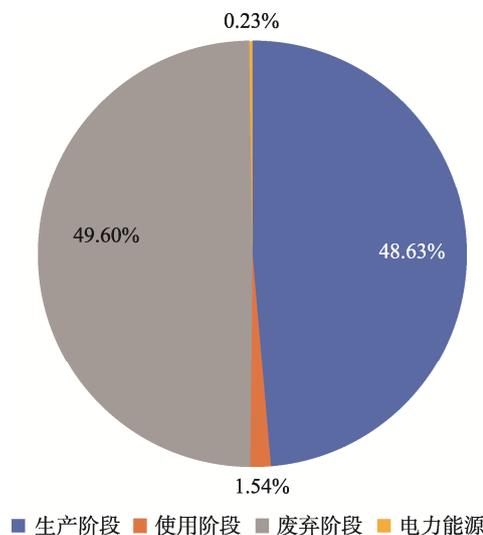


图 2 铁木箱各阶段碳排放比例
Fig.2 Carbon emission ratio of ironwood box at different stages

5 结语

本文根据铁木箱与聚丙烯循环包装箱在企业中实际使用情况做出环境友好性对比,主要从4个阶段对铁木箱的碳排放量进行计算,目标和范围定义阶段以计算铁木箱的全生命周期碳排放为目的,使用国际标准尺寸的单个铁木箱作为基本计算单元,界定其系统边界。生命周期清单分析阶段通过企业实地调研搜集铁木箱详细数据,查阅文献资料获取不同材料、能源和车辆的碳排放因子。生命周期影响评价和结果解释阶段通过核算铁木箱碳排放,明确钢材的制造与回收是影响铁木箱碳排放的关键系数。最终得出铁木箱的碳排放量远大于同尺寸聚丙烯包装箱的结论,说明在本文的假设条件下铁木箱的环境友好性要低于聚丙烯包装箱,因此,“以塑代木”是较为合适的环保包装选择。

参考文献:

- [1] 国务院关于印发“十四五”节能减排综合工作方案的通知[J]. 资源再生, 2022(1): 54-58.
Notice of the State Council on Printing and Distributing the Comprehensive Work Plan for Energy Conservation and Emission Reduction in the 14th Five Year Plan[J]. Resource Recycling, 2022(1): 54-58.
- [2] FINNVEDEN G, HAUSCHILD M Z, EKVALL T, et al. Recent Developments in Life Cycle Assessment[J]. Journal of Environmental Management, 2009, 91(1): 1-21.
- [3] PANDEY D, AGRAWAL M, PANDEY J S. Carbon Footprint: Current Methods of Estimation[J]. Environmental Monitoring and Assessment, 2011, 178(1/2/3/4): 135-160.
- [4] GUO X, YAO S J, WANG Q F, et al. The Impact of Packaging Recyclable Ability on Environment: Case and Scenario Analysis of Polypropylene Express Boxes and Corrugated Cartons[J]. Science of the Total Environment, 2022, 822: 153650.
- [5] 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.
REN S H, ZHANG Y, ZHU L, et al. Calculation Method of Life Cycle Carbon Footprint of Circulating Packaging[J]. Packaging Engineering, 2023, 44(13): 245-252.
- [6] 林华敏, 王星, 王玉龙. 绿色包装设计评价方法研究——以框架木箱碳足迹计算为例[J]. 绿色包装, 2023(5): 35-40.
LIN H M, WANG X, WANG Y L. Study on Evaluation Method of Green Packaging Design—Take the Calculation of Carbon Footprint of Frame Wooden Cases as an Example[J]. Green Packaging, 2023(5): 35-40.
- [7] 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 G F, LI X. Impact Analysis and Comparison of Two Wooden Packaging Boxes during Life Cycle[J]. Packaging Engineering, 2021, 42(5): 134-141.
- [8] 王家, 崔欣, 匡巍巍. 聚丙烯产品碳足迹核算及对比研究[J]. 中外能源, 2023, 28(6): 84-88.
WANG J, CUI X, KUANG W W. Carbon Footprint Calculation and Comparative Study of Polypropylene Products[J]. Sino-Global Energy, 2023, 28(6): 84-88.
- [9] 曹华林. 产品生命周期评价(LCA)的理论及方法研究[J]. 西南民族大学学报(人文社会科学版), 2004, 25(2): 281-284.
CAO H L. Research on the Theory and Method of Product Life Cycle Assessment (LCA)[J]. Journal of Southwest Minzu University (Humanities and Social Science), 2004, 25(2): 281-284.
- [10] 王鑫婷, 方芳, 朱仁高, 等. 包装产品的全生命周期评价[J]. 绿色包装, 2019(8): 51-54.
WANG X T, FANG F, ZHU R G, et al. Life Cycle of Assessment of Packaging Products[J]. Green Packaging, 2019(8): 51-54.
- [11] 王珊珊, 张寒, 杨红强. 中国人造板行业的生命周期碳足迹和能源耗用评估[J]. 资源科学, 2019, 41(3): 521-531.
WANG S S, ZHANG H, YANG H Q. Carbon Footprint and Energy Consumption Based on Life Cycle Assessment of Wood-Based Panel Industry in China[J]. Resources Science, 2019, 41(3): 521-531.
- [12] 王军会, 杨秦丹. 胶合板产品生命周期(LCA)评价分析[J]. 陕西林业科技, 2019, 47(5): 72-75.
WANG J H, YANG Q D. Analysis of Life Cycle Assessment for Plywood[J]. Shaanxi Forest Science and Technology, 2019, 47(5): 72-75.
- [13] 李新创. 中国钢铁产品全生命周期评价理论与实践[J]. 中国冶金, 2019, 29(4): 1-5.
LI X C. Theory and Practice of Life Cycle Assessment for Steel Products in China[J]. China Metallurgy, 2019, 29(4): 1-5.
- [14] 王丽, 彭叶怡, 骆琦, 等. 基于LCA与低碳约束的家具设计方法研究[J]. 家具与室内装饰, 2023, 30(7): 16-21.
WANG L, PENG Y Y, LUO Q, et al. Research on Furniture Design Methods Based on LCA and Low Carbon Constraints[J]. Furniture & Interior Design, 2023, 30(7): 16-21.

- [15] 李静, 刘燕. 基于全生命周期的建筑工程碳排放计算模型[J]. 工程管理学报, 2015, 29(4): 12-16.
LI J, LIU Y. The Carbon Emission Accounting Model Based on Building Lifecycle[J]. Journal of Engineering Management, 2015, 29(4): 12-16.
- [16] 高春艳, 牛建广, 王斐然. 钢材生产阶段碳排放核算方法和碳排放因子研究综述[J]. 当代经济管理, 2021, 43(8): 33-38.
GAO C Y, NIU J G, WANG F R. Review of Carbon Emission Accounting Methods and Carbon Emission Factor in Steel Production[J]. Contemporary Economic Management, 2021, 43(8): 33-38.
- [17] 赵艺伟, 左海滨, 余雪峰, 等. 钢铁工业二氧化碳排放计算方法实例研究[J]. 有色金属科学与工程, 2019, 10(1): 34-40.
ZHAO Y W, ZUO H B, SHE X F, et al. Case Study on Calculation Method of Carbon Dioxide Emission in Iron and Steel Industry[J]. Nonferrous Metals Science and Engineering, 2019, 10(1): 34-40.
- [18] WILSON J B, SAKIMOTO E T. Gate-to-Gate Life-Cycle Inventory of Softwood Plywood Production[J]. Wood and Fiber Science, 2005, 37: 58-73.
- [19] 张春霞, 章蓓蓓, 黄有亮, 等. 建筑物能源碳排放因子选择方法研究[J]. 建筑经济, 2010, 31(10): 106-109.
ZHANG C X, ZHANG B B, HUANG Y L, et al. Study on Choice Method of Energy's Carbon Emission Factors for Buildings[J]. Construction Economy, 2010, 31(10): 106-109.
- [20] SHAN Y L, GUAN D B, LIU J H, et al. Methodology and Applications of City Level CO₂ Emission Accounts in China[J]. Journal of Cleaner Production, 2017, 161: 1215-1225.
- [21] 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 Q X, LI J J, GONG X Z, et al. Life Cycle Assessment of Coal to Polypropylene Based on Two Different Routes[J]. Coal Conversion, 2022, 45(4): 1-9.
- [22] 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 J Y, ZHANG H, TAN Q H, et al. Calculation of Carbon Emissions of a Small Scale Waste Pyrolysis-Gasification Incineration Plant[J]. Environmental Sanitation Engineering, 2021, 29(4): 1-6.
- [23] WÜBBEKE J, HEROTH T. Challenges and Political Solutions for Steel Recycling in China[J]. Resources, Conservation and Recycling, 2014, 87: 1-7.
- [24] 刘宏强, 付建勋, 刘思雨, 等. 钢铁生产过程二氧化碳排放计算方法与实践[J]. 钢铁, 2016, 51(4): 74-82.
LIU H Q, FU J X, LIU S Y, et al. Calculation Methods and Application of Carbon Dioxide Emission during Steel-Making Process[J]. Iron & Steel, 2016, 51(4): 74-82.
- [25] 沈丹丹. 建筑全生命周期碳排放量计算模型[J]. 建筑施工, 2021, 43(10): 2162-2166.
SHEN D D. Calculation Model of Carbon Emission in Full Life Cycle of Buildings[J]. Building Construction, 2021, 43(10): 2162-2166.
- [26] EGGLESTON H S, BUENDIA L, MIWA K, et al. IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories. Volume 2: Energy Chapter 2: Stationary Combustion[R]. Japan: Japan Institute for Global Environmental Strategy, IGES, 2006: 11-13.