

# 生命周期评价在家电产品中的应用研究

## Life Cycle Assessment Research on Household Appliances

车 帅<sup>1</sup> 俞小成<sup>1</sup> 朱培鑫<sup>2</sup> 刘彦超<sup>1</sup> 孙世海<sup>1</sup> 陈显贺<sup>1</sup>

(1. 沈阳化工大学机械与动力工程学院 沈阳 110020;

2. 中国科学院大连化学物理研究所 大连 116023)

**摘要:** 在“碳达峰”和“碳中和”的背景下,定量评估家电产品的环境负荷,为家电行业实现绿色制造提供科学指导和实现家电行业高质量具有重要意义。国内外学者采用生命周期评价(Life Cycle Assessment, LCA)方法对家电产品进行了一系列研究,取得了优异的成果。本文按照时间顺序系统总结了近年来LCA在电视、冰箱和空调的国内外生命周期评价应用研究进展,总结了生命周期评价在家用电器产品中的应用意义,目的是促进中国家电行业的可持续发展,同时为家电产品的生命周期评估研究提供一定的指导和帮助。

**关键词:** 生命周期评价; 家电产品; 环境影响

**Abstract:** In the context of “carbon peak” and “carbon neutrality,” quantitatively evaluating the environmental burden of household appliances provides scientific guidance for green manufacturing and is of great significance for the high-quality development of the household appliance industry. Scholars at home and abroad have conducted a series of studies on household appliances using the Life Cycle Assessment (LCA) method, achieving excellent results. This article systematically summarizes the recent progress of LCA in the domestic and foreign lifecycle assessment of televisions, refrigerators, and air conditioners in chronological order, and summarizes the significance of lifecycle assessment in household appliances. The aim is to promote the healthy development of China’s household appliance industry and provide a reference for in-depth research on the lifecycle assessment of household appliances in China.

**Key words:** life cycle assessment; household appliance products; environmental effect

### 引言

全球气候变化和资源紧缺的挑战,促使各国政府和企业采取更多的环境保护措施,提高家电产品的节能减排效果。消费者对家电产品的环境性能和社会责任的关注度不断提高,形成了一种绿色消费的趋势。通过对家电产品从原材料开采、制造、运输、使用到废弃处理等各个阶段的环境影响进行分析和评估,可以找出改善产

品环境性能的机会和方法,提高资源利用效率,减少污染排放,促进可持续发展。赵国庆<sup>[1]</sup>等采用LCA方法对包钢稀土产品从原材料采集、生产加工的生命周期过程进行了环境影响评价,解析了稀土产品生命周期碳排放的构成,在各个工序的分布情况,发现了产品全流程碳排放的最大影响因素,进而制定出科学的减碳策略,系统化、量化地对稀土企业进行低碳规划。本文简单介

项目基金: 高炉渣基沸石类CO<sub>2</sub>吸附剂的开发及气体吸附性能研究,项目编号:LQ2020016。

绍了生命周期评价方法，系统总结了近年来生命周期评价在国内外家电产品应用的研究进展，旨在促进生命周期评价在家电产品中进一步推广应用，方便家电产业进行低碳规划。

## 1 生命周期评价

### 1.1 生命周期评价概述

LCA 是一种工具，用于综合评估产品和服务在其整个生命周期中涉及的环境因素和环境影响<sup>[2]</sup>。生命周期评价的方法自 1969 年问世以来，无论是在学术界还是工业界都得到广泛的应用。LCA 是对产品系统从生产到废弃的全过程中涉及的输入、输出以及潜在环境影响的综合评估。LCA 主要包括四个步骤：明确评估目标和范围、分析清单、评估影响和解释评估结果。这些步骤共同构成了 LCA 方法的全面评估过程<sup>[3]</sup>，如图 1 所示。

### 1.2 生命周期评价的意义

LCA 方法特别注重产品在其生产过程中的各种能源的消耗以及生产过程中对环境所造成的影响。它的出现可以使人们在产品生产的过程中更加方便地去追求高效率、低污染、低能耗和低排放，更加有利于实现“碳中和”和“碳达峰”的目标，同时也大大的推进了清洁生产步伐。从长远的利益来说，将 LCA 运用于我国的工业化大生产中能够大大提高生产的效率，减轻对环境危害的影响，有助于企业的发展以及我国社会主义经济健康发展的进程<sup>[4]</sup>，如图 2 所示。

## 2 家电产品 LCA 研究应用

### 2.1 电视

赵新等<sup>[5]</sup>根据 PAS2050 评估标准和 LCA 理论，开发了一款对家电产品进行碳排放评估的软件，并以液晶电视为目标，对其从生产到回收全过程的资源利用、能源消耗和产品的回收利用研究。王玲等<sup>[6]</sup>基于德国的 GaBi 软件对液晶电视生产制造过程中的环境影响进行了研究，并找出了对其生产过程中对环境的影响最大的环节，针对性地提出了改进意见，对液晶电视的绿色制造提供了宝贵经验。此后，王玲和刘阳<sup>[7]</sup>等人采用了 LCA 方法，对

电视机的水足迹和 CML2001 进行了简要分析。王玲和邢军<sup>[8]</sup>等人还采用生命周期评价方法，通过 GaBi 软件对电视机进行了从“摇篮”到“坟墓”的全过程研究，针对电视机生产和使用阶段的环境影响最大，采用蒙特卡洛仿真法，对其生产在制造过程进行了碳排放研究，并提出使用清洁能源发电和在不影响电视机使用性能的前提下使用对碳排放影响较小的材料代替等改进方案。

国外学者 Roland H 等<sup>[9]</sup>对等离子 (PDP) 电视采用生命周期评价方法进行了详细全过程 LCA 研究，并首次将其与两种竞争技术 (阴极射线管 CRT 和液晶显示 LCD) 进行了比较。得出生产阶段和使用阶段是其最重要的生命周期阶段，而运输阶段和回收阶段对环境的影响则相对较小。PDP 技术在每平方英寸屏幕上对环境的影响最小，但也有最高的电力消耗。为了减少环境影响，并提出了延长电子设备的使用寿命，提高回收效率，减少电力消耗，并使用更多可再生能源的建议。

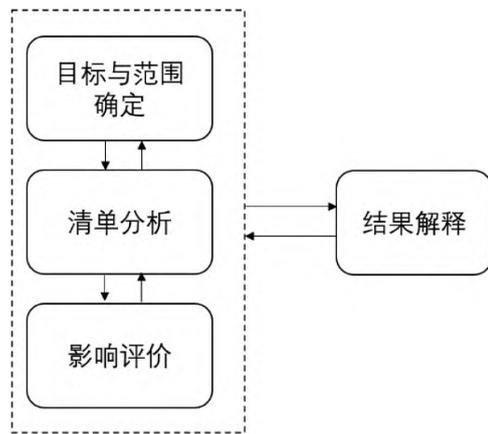


图 1 LCA 研究框架

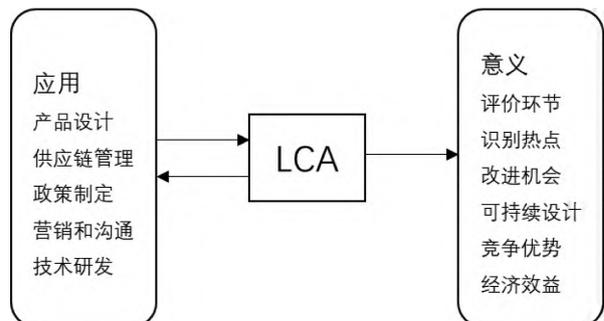


图 2 LCA 的意义

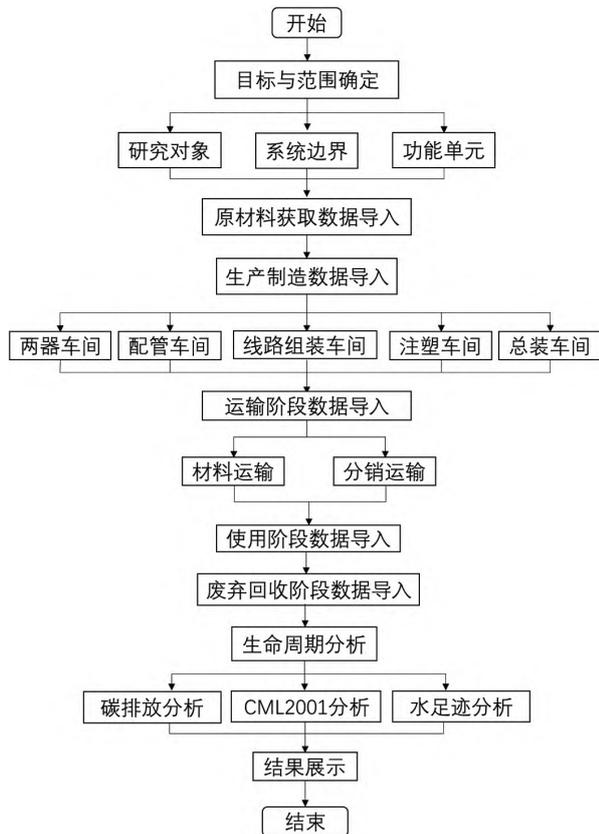


图3 LCA软件工作流程图<sup>[20]</sup>

Nicholas J. T 等<sup>[10]</sup>研究了液晶电视从“摇篮”到“大门”的生命周期评价影响，特别关注三氟化氮（NF<sub>3</sub>）的排放。NF<sub>3</sub>是温室气体，但当时未被《京都议定书》监测。得出液晶电视使用阶段对全球变暖影响最大，NF<sub>3</sub>对全球变暖潜能值的贡献很小。然而随着能源效率的提高，NF<sub>3</sub>可能会变得很重要。该研究为制造商提供了确定温室气体最大来源及其在产品生命周期分析中的联系的能力，如图3所示。

Rikke D 等<sup>[11]</sup>对电视进行生命周期评估，分析除使用阶段的能源消耗分析外，是否应将其他环境热点和生命周期阶段包括在生态设计指示的IM的要求内。得出对于IM中未来的需求设置，有必要建立覆盖产品更多生命周期阶段的需求，以解决最重要的影响。Roland H 等<sup>[12]</sup>之后又对FED电视设备进行了生命周期评估(LCA)研究，分析了其与当今显示技术的环境影响比较，并考虑了纳米颗粒的使用。得出FED电视设备的生产阶段对环境影响最大，而使用阶段则具有明显的优势。研究还强调了在LCA研究中充分整合纳米颗粒释放的重要性，以实现真正全面的评估，如图4所示。

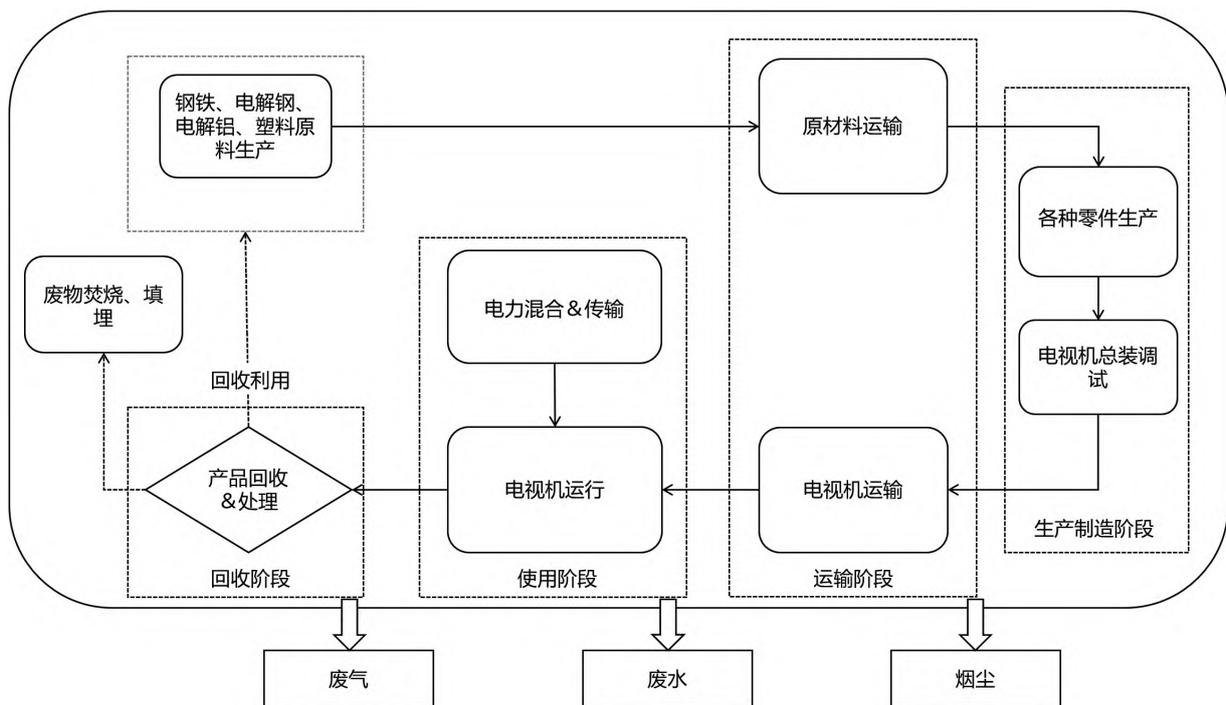


图4 典型电视机全生命周期系统边界<sup>[7]</sup>

## 2.2 冰箱

张建普等<sup>[13]</sup>介绍了一种基于企业 ERP 系统的产品环境影响评价体系,解决了生命周期评价在数据收集方面的困难,并以电冰箱为例进行了实证分析。侯坚<sup>[14]</sup>分析了家用电冰箱产品在原材料选择、生产、包装、使用和报废阶段的生态设计评价应用,介绍了一种生态设计改进分析方法,并计算分析了典型家用电冰箱产品的生命周期环境影响,分析出可取的改进措施,有助于企业改进产品的同时减小环境影响且不过多增加生产成本。张北鲲等<sup>[15]</sup>分析了家用冰箱的生命周期碳足迹,并用调整容积的方法统一了冰箱产品的功能描述。然后,根据产品功能和生命周期碳排放的关键影响因素,建立了家用冰箱的生命周期碳排放评价指标体系,为电冰箱的低碳设计提供支持。

杨欢等<sup>[16]</sup>采用全生命周期评价(LCA)法对 10 000 台冰箱的能源消耗和环境影响进行了分析。得出结论,使用阶段是最主要的影响因素,其次是原材料提取阶段和制造阶段,废弃处理阶段和销售运输阶段相对较小。指出要减少冰箱行业对环境的负面影响,提高环境质量的关键是降低使用阶段的电能消耗,并建议冰箱生产企业改进产品节能设计,提高冰箱能效水平和消费者节能意识,如图 5 所示。

国外学者 Alexis G 等<sup>[17]</sup>通过电冰箱实例介绍了一种基于 LCA 的方法和工具,可以让设计师在概念设计阶段,用“生命周期砖”来构建和分析产品的生命周期及其环

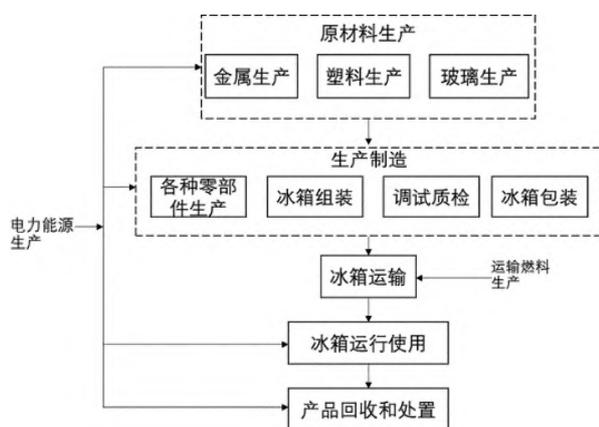


图 5 典型冰箱产品 LCA 系统边界

境影响,并提出改进方案。该方法不需要准确的产品结构,只需要一些抽象化的数据,就可以让设计师对环境影响有所了解。Anne-Sophie F 等<sup>[18]</sup>使用了基于 ISO 14040 的生命周期评估方法,介绍了巴西的冰箱回收系统对环境的影响和优势,以及它如何作为一种节能措施。

Federica C 等<sup>[19]</sup>探讨了环境可持续性和循环经济在冰箱/冷冻柜生命周期中的作用。作者指出,环境可持续性对企业有利,可以降低能源、资源和关键材料的消耗,减少产品生命周期足迹。循环经济则提供了多种策略,如回收、再利用、再制造和延长寿命,以减少影响。作者使用生命周期评估(LCA)方法评估了冰箱/冷冻柜从制造到废弃的整个过程中的环境表现,并重点分析了泡沫老化对产品热性能和耐久性的影响。作者认为,需要从宏观层面上合理地评估泡沫老化,并在更换零件或整体产品时做出明智而全面的选择。为从环境可持续性角度考虑使用阶段需要大量资源的产品提供了一种有效地整合实际参数和耐久性演变的方法。

## 2.3 空调

蒋诗新等<sup>[20]</sup>使用 GaBi 软件对家用空调进行全生命周期评价研究,得出其全生命周期的碳排放总量,其中使用阶段占比最多,同时通过不确定分析和敏感性分析得知影响该产品碳排放的主要因素,针对性提出了相应的改进意见。刘阳等<sup>[21]</sup>采用 eFootprint 软件对空调进行生命周期碳足迹分析,发现使用阶段占总排放量的 95.06%,建议改进关键部件的环保节能技术以减少碳排放。周丽<sup>[22]</sup>评价了家用空调全生命周期的环境影响,发现使用阶段影响最大,并从设计、生产、使用和回收等方面提供改善意见。

张城等<sup>[23]</sup>介绍了一种基于全生命周期分析和商空间理论的家电产品低碳认证方法,该方法可以识别出产品生命周期中碳排放的主要阶段和关键因素,并以空调产品为例进行了实证分析,验证了该方法的可行性和有效性,为家电产品低碳设计、推动低碳消费和实现国家减排计划任务提供理论支撑。胡嘉琦等<sup>[24]</sup>开发了基于生命周期理论的家电产品环境绩效评估软件,并以家用空调

为例, 对其生命周期各阶段环境性能进行评价, 为家电产品低碳设计提供了指导。李小燕等<sup>[25]</sup>使用生命周期评价方法比较了 R290 和 R32 两种制冷剂在家用空调中的碳排放。结果显示, R290 的碳排放比 R32 低 15%, 用 R290 替代 R32 对环境有利, 也提醒了制冷剂回收策略的风险。

国外学者 Stephen A 等<sup>[26]</sup>以新加坡空调系统为例, 探讨了使用阶段用户行为对全球变暖的影响, 使用从传感器获得的高分辨率数据集, 对单个办公室使用者的能源使用和行为模式进行了概率分布的描述, 并将个体间的变异性和使用阶段变量传播到模型中, 通过蒙特卡罗分析进行了模拟。通过生成的不确定性分析, 确定了通过改善用户互动来减少全球变暖影响的可能性。

Maggie D 等<sup>[27]</sup>指出空调系统的能源消耗和温室气体排放对气候变化有负面影响, 因此需要对不同的空调技术和方法进行比较, 以提高可持续性。但, 目前已发表的空调系统 LCA 之间缺乏一致性和可比性, 主要是因为功能单元的定义不同。功能单元是 LCA 中用来描述产品或服务的基本功能和数量的指标。他建议将空调系统的功能单元定义为向受控空间添加或移除 1 MJ 热量, 以确保未来的研究可以进行比较, 如图 6 所示。

Aiman Z 等<sup>[28]</sup>选择了一种窗式空调作为案例, 按照 ISO 14044-2006 LCA 标准, 对其进行了环境清单分析, 并与新制造空调进行了比较。这个案例展示了如何识别和记录空调再制造过程的环境清单, 为进一步的研究提供参考, 以比较不同空调再制造方式和新制造方式的环境负担, 也为空调厂商在考虑其产品是否进行再制造时, 更好地评估其整体环境绩效。

### 3 结语

通过对家电产品的生命周期评价综述, 可以发现虽然国外在这方面起步较早, 但近年来我国在这一方面的研究也在不断扩展和深入, 我国已经将 LCA 运用到了绝大多数的家电产品中, 并且取得了不错的成果, 为绿色制造和节能减排做出了贡献。家电产品 LCA 可以帮助我们掌握某款家电产品带来的特定环境影响情况, 识别某款家电产品环境协调性方面的问题与改善潜力, 不同款产品间环境影响的相互比较, 进行家电产品指定单元过程的工艺方案优化或决策, 产品设计过程中的方案比较, 企业环境绩效评价, 环境标志和声明等。目前, 家电产品 LCA 存在的问题主要有以下几个方面: 数据的获取和管理困难, 缺乏统一的数据库和标准; 方法的选择和

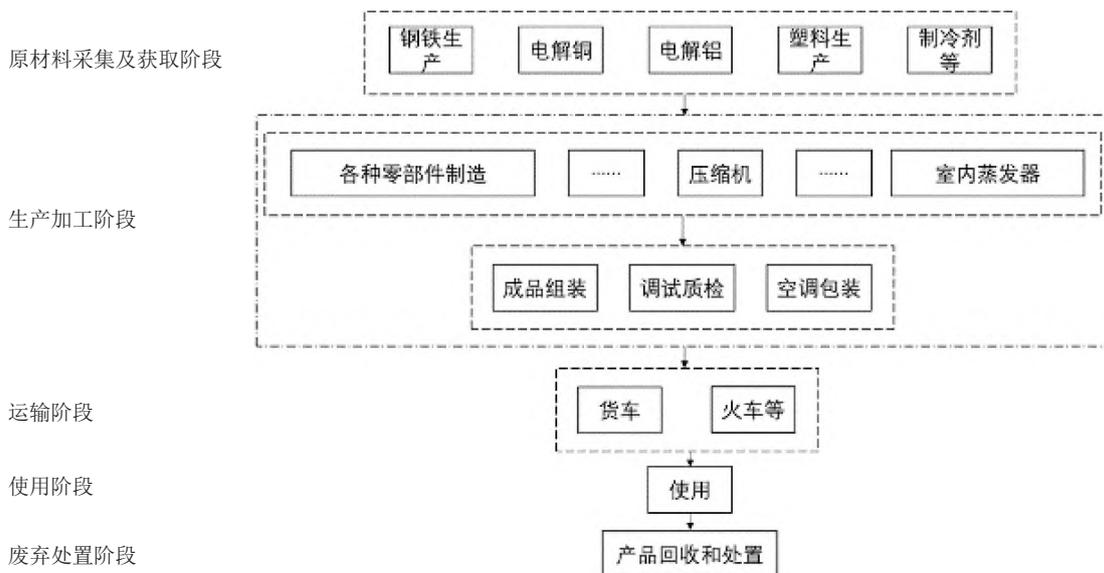


图6 空调产品 LCA 典型研究范围

应用不一致, 缺乏通用的评价框架和指标体系; 结果的解释和传播不充分, 缺乏有效的沟通和反馈机制; 服务的创新和延伸不够, 缺乏与消费者和社会需求相适应的服务模式。这些问题限制了家电产品生命周期评价的发展。相信通过改进以上几点, 就能够在最大程度上体现出 LCA 在家电产品中的巨大优越性, 并且最大的减小环境负荷, 也可以更好的促进我国经济和环境的的发展, 为 LCA 在我国取得长远的发展做好铺垫。

#### 参考文献:

- [1] 赵国庆, 洪湃, 班华等. 碳达峰碳中和背景下稀土产品的生命周期评价 [J]. 有色金属工程, 2022, 12(5):144-148.
- [2] YUDHISTIRA R, KHATIWADA D, SANCHEZ F. A comparative life cycle assessment of lithium-ion and lead-acid batteries for grid energy storage [J]. Journal of Cleaner Production, 2022, 358.
- [3] 陈亮, 刘玫, 黄进. GB/T 24040-2008《环境管理 生命周期评价原则与框架》国家标准解读 [J]. 标准科学, 2009, (2): 76-80.
- [4] 沈建, 林文树, 吴金卓. 生命周期评价在木材产品生产中的应用研究综述 [J]. 森林工程, 2014, 30(5):61-65.
- [5] 赵新, 万超, 符永高, 等. 基于碳排放绩效指标的家电产品碳足迹分析 [J]. 家用电器, 2014(12):75-79.
- [6] 王玲, 万超, 符永高等. 基于 GABI 的液晶电视机环境影响评价 [J]. 家电科技, 2015(1):40-42.
- [7] 王玲, 刘阳, 邢军等. 基于产品生命周期分析的电视机环境绩效评价 [J]. 家用电器, 2019(2):11-17+33.
- [8] 王玲, 刘阳, 万超等. 面向全生命周期理论的电视机环境绩效评价 [J]. 企业科技与发展, 2019(11):138-140.
- [9] HISCHIER R, BAUDIN I. LCA study of a plasma television device [J]. The International Journal of Life Cycle Assessment, 2010, 15(5): 428-38.
- [10] THOMAS N J, CHANG N-B, QI C. Preliminary assessment for global warming potential of leading contributory gases from a 40-in. LCD flat-screen television [J]. The International Journal of Life Cycle Assessment, 2011, 17(1): 96-104.
- [11] HUULGAARD R D, DALGAARD R, MERCIAI S. Ecodesign requirements for televisions—is energy consumption in the use phase the only relevant requirement? [J]. The International Journal of Life Cycle Assessment, 2013, 18(5): 1098-105.
- [12] HISCHIER R. Life cycle assessment study of a field emission display television device [J]. The International Journal of Life Cycle Assessment, 2014, 20(1): 61-73.
- [13] 张建普, 于随然. 基于 ERP 系统的电冰箱生产环节环境影响评价 (上) [J]. 家电科技, 2010(2):53-55.
- [14] 侯坚. 家用电冰箱生态设计评价研究 [J]. 质量与认证, 2015 (6):53-55.
- [15] 张北鲲, 万超, 王玲, 等. 家用电冰箱碳排放评价指标体系研究 [J]. 家用电器, 2016(9):29-32+41.
- [16] 杨欢, 崔丽, 朱庆华. 考虑安全处理比例的冰箱全生命周期影响评价 [J]. 系统工程, 2016, 34(5):136-143.
- [17] GEHIN A, ZWOLINSKI P, BRISSAUD D. Integrated design of product lifecycles—The fridge case study [J]. CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology, 2009, 1(4): 214-20.
- [18] FOELSTER A-S, ANDREW S, KROEGER L, et al. Electronics recycling as an energy efficiency measure – a Life Cycle Assessment (LCA) study on refrigerator recycling in Brazil [J]. Journal of Cleaner Production, 2016, 129: 30-42.
- [19] CAPPELLETTI F, MANES F, ROSSI M, et al. Evaluating the environmental sustainability of durable products through life cycle assessment. The case of domestic refrigerators [J]. Sustainable Production and Consumption, 2022, 34: 177-89.
- [20] 蒋诗新, 田晓飞, 王玲, 等. 家用空调全生命周期碳足迹分析 [J]. 家用电器, 2016(9):46-52+56.
- [21] 刘阳, 王玲, 符永高, 等. 基于 eFootprint 软件的空调生命周期碳足迹分析 [J]. 家用电器, 2018(1):18-21.
- [22] 周丽. 家用空调产品的生命周期评价研究 [J]. 环境保护与循环经济, 2018, 38(8):12-14+18.
- [23] 张城, 田晓飞, 阚欢迎, 等. 面向低碳认证的家电产品碳排放核算方法研究 [J]. 合肥工业大学学报 (自然科学版), 2018, 41(9):1158-1165.
- [24] 胡嘉琦, 朱宽宽, 杜彬, 等. 家电产品生命周期评估分析: 以家用空调为例 [J]. 家用电器, 2019(12):55-61.
- [25] 李小燕, 宁前, 何国庚. 采用 R290 和 R32 的家用空调器全生命周期碳排放研究 [J]. 低温工程, 2021(2):33-40.
- [26] ROSS S A, CHEAH L. Uncertainty Quantification in Life Cycle Assessments: Interindividual Variability and Sensitivity Analysis in LCA of Air-Conditioning Systems [J]. Journal of Industrial Ecology, 2017, 21(5): 1103-14.
- [27] DEMARCO M, FORTIER M-O P. Functional unit choice in space conditioning life cycle assessment: Review and recommendations [J]. Energy and Buildings, 2022, 255.
- [28] ZIOUT A, ALKAHTANI M, ELGAWAD A E E A, et al. Environmental Inventory Analysis for Remanufacturing Initiative: Case Study of Air Conditioner Remanufacturing [J]. Applied Sciences, 2022, 12(12).

#### 作者简介:

车帅 (1986-), 博士, 讲师, 主要研究方向: 二氧化碳吸附, 固体废物资源化等。