

家电产品生命周期评估分析：以家用空调为例

Life Cycle Assessment of Home Appliances: Taking Household Air Conditioners as an Example

胡嘉琦¹ 朱宽宽² 杜彬¹ 邓梅玲¹ 韩文生¹

(1. 中国电器科学研究院股份有限公司 广州 510300; 2. 合肥工业大学 合肥 230009)

摘要：为了减少家电产品在生命周期各阶段对环境的影响，本文在对家用空调分析的基础上，开发了基于生命周期理论的家电产品环境绩效评估软件。首先介绍了家电产品环境绩效评估软件的功能模块设计与工作流程设计，然后通过家电产品环境绩效评估软件 1.0，对家用空调建立了生命周期模型，并对其生命周期各阶段环境性能进行评价，为设计人员进行家用空调的低碳设计提供支持。

关键词：家电产品；生命周期分析；评估软件

Abstract: In order to reduce the impact of home appliances on the environment at various stages of the life cycle, based on the analysis of household air conditioners, this paper develops an environmental performance assessment software for home appliances based on life cycle theory. Firstly, the functional module design and workflow design of the home appliance environmental performance assessment software are introduced. Then, through the home appliance environmental performance assessment software 1.0, the life cycle model of the household air conditioner is established, and the environmental performance of each stage of the life cycle is evaluated. Designers support the low carbon design of home air conditioners.

Key words: home appliances; life cycle analysis; evaluation software

引言

近年来，中国社会经济飞速发展，人民生活水平不断提高，包括家用空调在内的家电产品的使用量也不断增加。相关数据显示：2018 年家用空调产量为 14 985.05 万台，同比增长 4.4 %；2018 年 12 月，家用空调产量为 1 157 万台，同比增长 3.17 %。^[1]然而，家电产品使用量的快速增加给人们生活带来便利的同时，也引发了能源消耗大与环境污染严重等一系列问题。产品对环境的影响存在于从原材料获取到废物回收的整个生命周期，而且对于不同种类的产品需要不同的评价方法。为了准确高效的评价与分析家用空调对环境的影响，开发一种面向家用空调的基于生命周期理论的家电产品环境绩效评

估系统是十分有必要的。

从 1969 年美国中西部研究所对饮料容器从原材料获取到废弃物处理全过程的跟踪有分析开始，到目前为止，国内外已经有大量学者对不同类型产品进行生命周期的分析研究。美国 Argonne 实验室^[2]针对汽车替代燃料全生命周期建立了 GREET 模型，并对其做了大量的实例研究，对汽车燃料生命周期的能源消耗和气体排放分析，并对其中各个具体阶段进行对比阐述。Haapala 等^[3]建立了产品制造过程的能耗预测模型，并对产品的环境绩效分析，有效降低了其生命周期中能源及原材料的消耗与废弃物的排放。龙苏华等^[4]运用中国汽车生命周期评价系统 (CALCA)，对汽车零部件生命周期评

广东省重点领域研发计划项目“基于互联网+的电子废弃物智能处置关键技术研究及示范”，项目编号：2019B110209001

价进行研究,识别汽车零部件生命周期内不同阶段的环境影响。钟言久等^[5]根据聚酯树脂产品的生产特点,开发一种基于生命周期理论的聚酯树脂产品环境绩效评价工具,为聚酯树脂的生命周期分析提供指导。吕杰锋等^[6]对共享单车生命周期不同阶段的环境影响进行对比分析,从设计的角度提出改进建议,弥补作为可持续产品服务系统的共享单车在可持续方面的欠缺,让共享单车更可持续。

总的来说,全球范围内对产品生命周期分析已进行了非常多的研究,但针对家电产品的生命周期分析却寥寥无几,而家电产品产量的逐年增加给环境带来的影响却日益严重。因此,为了减少家电产品在生命周期各阶段对环境的影响,引导绿色消费,保护生态文明,对家电产品进行全生命周期分析显得尤为重要。

本文在对家用空调分析的基础上,开发了基于生命周期理论的家电产品环境绩效评估软件 1.0,通过该软件对家用空调建立了生命周期模型,实现了家用空调的分阶段分工艺环境性能评价,为设计人员进行家用空调的低碳设计提供支持。

1 生命周期评价系统设计

家电产品环境绩效评估软件 1.0 运行环境为 Windows7 及以上的操作系统以及 Sqlite3 数据库,使用的汇编语言为 JavaScript 和 HTML5。该软件的主要功能是为家电产品提供环境影响评价方法和计算框架,评估家电产品的环境绩效,能够满足不同产品的评价需求,保证评价实时性和可靠性。

1.1 系统功能模块设计

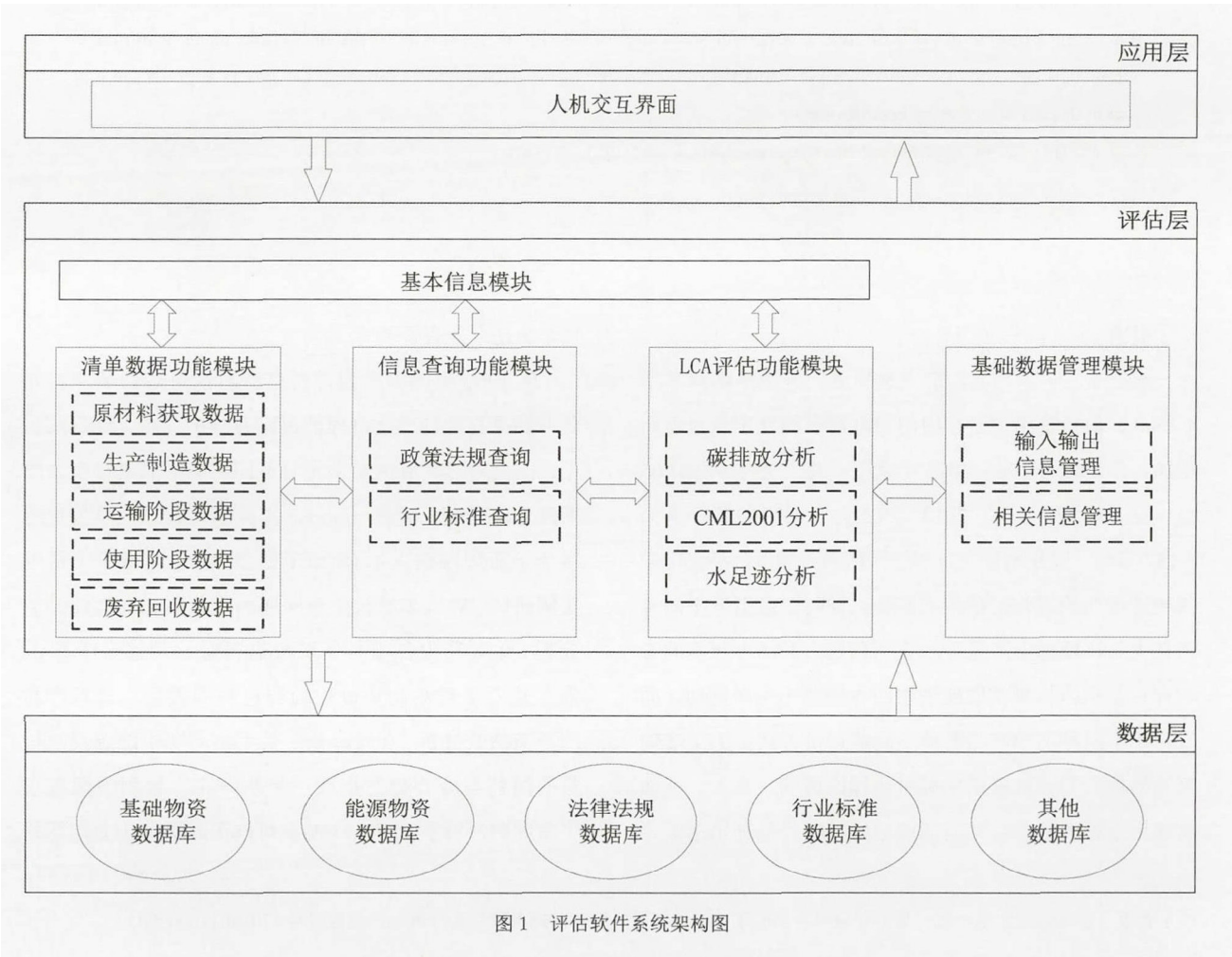


图 1 评估软件系统架构图

根据生命周期评价原则和功能要求,整个系统分为五个功能模块:基本信息功能模块、清单数据功能模块、LCA 评估功能模块、信息查询功能模块、基础数据管理模块,同时支持计算结果的分析和导出等功能,如图 1 所示为评估软件系统架构图。

1) 基本信息功能模块

基本信息功能模块主要用于存储案例的基本信息,包括基本信息和确定需评估的家电产品生命周期阶段两部分。

基本信息用于存储案例名称、产品型号、功能单位、评价目的、数据取舍原则等信息。家电产品生命周期阶段一般包括原材料获取、生产阶段、制造阶段、使用阶段和回收等阶段,用户可以根据需要自定义。

2) 清单数据功能模块

清单数据功能模块主要用来添加产品生产所需要的原材料获取、生产制造、运输、使用阶段和废弃回收五个部分数据。

在原材料获取数据中,主要添加家电产品所需要的原材料名称、用量等信息;生产制造数据中,主要添加每个工艺阶段需要的能耗信息和排放的废弃物;运输数据包括原材料运输和产品运输两个阶段的运输重量、运输距离和运输方式;使用阶段包括使用年限、耗能类型以及日耗电量;废弃回收阶段主要包括回收阶段输入的能量、排放的废物。

3) LCA 评估功能模块

LCA 评估为软件的环境绩效计算模块。该部分主要分为碳排放分析、CML 2001 分析和水足迹分析三个部分,分别计算家电产品原材料使用、能源使用、废物排放以及废弃能量输出各过程的碳排放结果、CML 2001 指标评估结果和水足迹。

4) 信息查询功能模块

信息查询功能模块主要为政策法规和行业标准的查询,双击每个条目名称,就会自动打开其所在网页,从而进行信息查询与预览。

5) 基础数据管理模块

基础数据管理模块主要用来管理基本数据,包括输入输出信息管理和相关信息管理。在输入输出信息管理中,添加或者删除基础数据库数据。相关信息管理中,添加或删除法律法规、标准以及行业信息。

1.2 系统工作流程设计

家电产品环境绩效评估软件 1.0 是基于生命周期理论的家电产品环境绩效评估系统,其工作流程可以分为 4 个步骤:目标与范围确定、各阶段数据导入、生命周期分析、结果展示,如图 2 所示为软件工作流程图。

步骤 1:评价目标和范围确定:该步骤主要工作是确定研究对象,确定系统边界以及主要功能单元,将这些确定后的信息填入基本信息功能模块中。

步骤 2:各阶段数据导入:该步骤主要导入家电产品生命周期各阶段数据,包括原材料获取、生产制造、运输、使用和废弃回收五个部分数据。

步骤 3:生命周期分析:导入家电产品清单分析阶



图 2 软件工作流程图

段的消耗与排放数据之后，软件自动对家电产品生命周期各环节的碳排放、CML 2001 和水足迹进行分析计算。

步骤 4：结果展示：软件进行生命周期分析以后，将分析结果以柱状图和饼状图的形式展示出来，用户可以根据研究目标进行选择。

2 家用空调生命周期分析

2.1 评价目标与范围确定

1) 目标确定

本文选用华凌空调的某款产品室外机的高压阀部件作为分析对象，对其从原材料获取到废物回收的全生命周期中的资源使用、能源消耗、废物排放以及废弃能量输出进行分析，确定对环境影响最大的阶段和主要影响因素，探索降低能耗和排放的具体方式。根据产品的生命周期定义以及高压阀部件生产的特点，高压阀部件生命周期不涉及使用阶段，故本文确定研究其生命周期中的四个阶段：原材料获取阶段、生产制造阶段、运输阶段和回收阶段。

2) 系统边界

高压阀部件的系统边界是对高压阀部件进行生命周期分析，并且收集相应阶段数据的重要边界。根据 ISO 14041 标准，高压阀部件的边界包括原材料获取阶段、生产制造阶段、运输阶段和回收阶段四部分。家用空调高压阀部件生命周期系统边界如图 3 所示。

3) 功能单位

本文选定的功能单位是广州华凌空调的某款产品室外机的高压阀部件。

2.2 清单分析

1) 原材料获取阶段

本研究中原材料数据清单根据产品原始物料清单经过修正综合分析得到的。高压阀部件由分液管、高压阀接管、U 型支撑等零件组成，主要考虑的原材料包括铜、聚酰胺纤维、环氧树脂三类，其他材料由于使用量较少，不予考虑。如表 1 所示为原材料获取阶段数据。

2) 生产制造阶段

高压阀部件由多个零件组成，其生产制造阶段主要在配管车间内完成，包括分液管、高压阀接管、U 型支撑、节流阀、高压阀和毛细管的制造与各零件之间的焊接。该阶段主要在电力带动下工作，主要消耗电能，生产制造阶段数据清单表 2 所示。

3) 运输阶段

本研究中运输阶段主要考虑家用空调的销售运输过

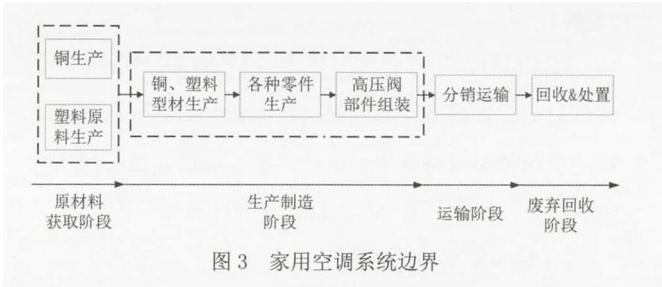


表 1 原材料获取阶段数据

序号	零件名称	材料名称	质量 (kg)	数量	单位
1	分液管	铜管	0.075 95	1	件
2	高压阀接管	铜管	0.014 79	1	件
3	U 型支撑	聚酰胺纤维	0.078	1	件
4	节流阀	黄铜	0.007 91	1	件
5	高压阀	铜管	0.013 3	1	件
		黄铜	0.072 97	1	件
6	毛细管	铜管	0.010 3	1	件
		铜管	0.019 16	1	件
7	助焊剂	环氧树脂	0.000 43	1	件
8	焊条	电解铜 / 阴极铜	0.001 69	1	件
9	焊丝	电解铜 / 阴极铜	0.000 08	1	件

表 2 生产制造阶段数据清单

部件名称	能源类型	能源用量
高压阀	电力	0.154 kwh

表 3 运输阶段数据清单

销售区域	起止点	运输距离	运输载体
北京	广州—北京	2 267 km	22 t/ 货车

表 4 回收阶段数据清单

名称	能源类型	能源用量
回收耗能	电力	0.026 kwh

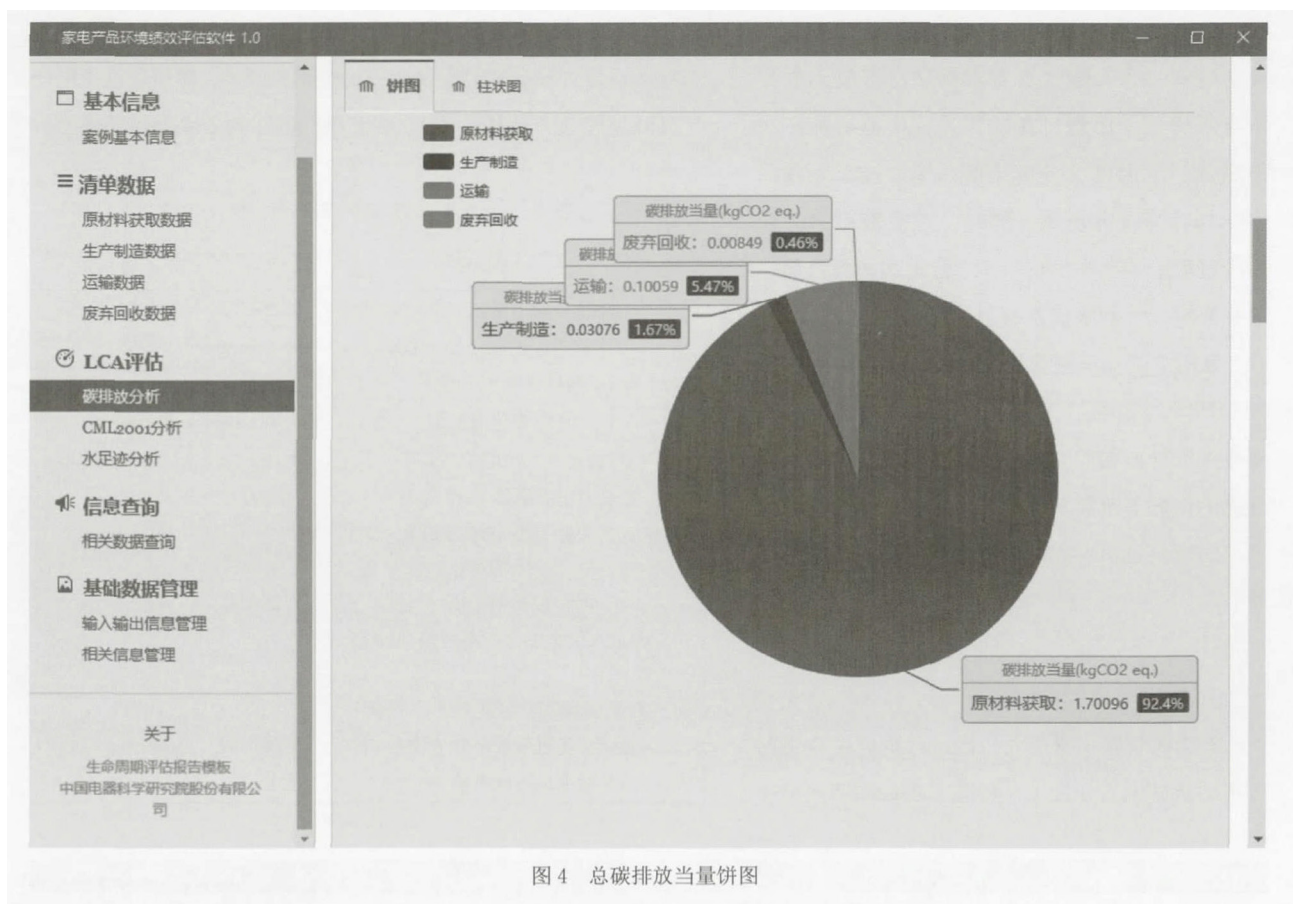


图4 总碳排放当量饼图

程,本款家用空调主要销售区域为北京,采用货车运输的方式从广州运往北京,燃料类型为柴油,运输阶段数据清单如表3所示。

4) 回收阶段

回收阶段主要是对家用空调高压阀部件进行拆解及材料回收。该阶段对环境的影响主要来源于回收设备的消耗的电能。回收阶段数据清单如表4所示。

2.3 结果分析

完成家用空调高压阀部件基本信息及各阶段数据的导入以后,软件自动对家电产品生命周期各环节的碳排放、CML 2001 和水足迹进行分析计算。

如图4所示为高压阀部件总碳排放当量饼图。由饼图可知,总碳排放当量为1.840 80 (kgCO₂ eq.)。其中原材料获取阶段碳排放当量为1.700 96 (kgCO₂ eq.) ,生产制造阶段碳排放当量为0.030 76 (kgCO₂ eq.) ,运输阶段碳排放当量为0.1005 9 (kgCO₂ eq.) ,回收阶段碳排放当

量为0.008 49 (kgCO₂ eq.)。对比各阶段碳排放当量,原材料获取阶段碳排放量最大,占总数的92.4 % ,回收阶段碳排放量最少,仅占总数的0.46 %。

根据家电产品环境绩效评估软件1.0分析结果,列出家用空调高压阀部件CML 2001影响潜能值如表5所示,各阶段CML 2001评估结果柱状图如图5所示。分析可知,家用空调高压阀部件CML 2001各类影响潜能中海水水生生态毒性潜能值(MAETP inf)最大,非生物资源(ADP化石)消耗量也比较大。生命周期各阶段的海水水生生态毒性潜能值(MAETP inf)原材料获取阶段最大,非生物资源(ADP化石)消耗量原材料获取阶段也为最大。

由以上分析结果可知,家用空调高压阀部件从生产制造到废弃回收的全生命周期内,原材料获取阶段对环境的影响最大。这种现象产生的原因是高压阀原材料主要是铜和塑料高分子,铜矿在开采、冶炼、金属加工过程中需要排放大量烟尘及废水,烟尘中含有大量

CO₂ 及有毒气体，对大气造成污染。废水中含铜量比较多，含有酸性及有毒物质，排放到外界污染水资源。而塑料在制作过程中需要加热，加热到一定温度会分解出酸、酯、过氧化物、CO、CO₂ 等有害物质，同时，通常塑料制品在生产过程中需要添加抗氧剂、稳定剂和着色剂，这些都对大气和水资源有很大的影响。

家用空调高压阀部件生命周期原材料获取阶段对环境的影响最大，因此在获取原材料时需要改进原材料制取工艺，或者在不改变家用空调性能的情况下改用其他对环境影响较小的物质代替，同时也要尽可能的降低其他阶段对环境的影响。

3 结论

本文在对家用空调外机高压阀部件生命周期分析的基础上，开发了一种基于生命周期理论的

家电产品环境绩效评估系统。本文首先介绍了生命周期评价系统的设计，包括其架构设计和工作流程设计，然后通过家电产品环境绩效评估软件 1.0，对家用空调建立了生命周期模型，

表 5 CML 2001 影响潜能值

影响类型	数值	单位
非生物资源消耗 (ADP 元素)	0.000 75	kgSb eq.
非生物资源消耗 (ADP 化石)	24.376 85	MJ
酸化潜能值 (AP)	0.013 06	KgSO ₂ eq.
富营养化潜能值	0.001 46	kgPhosphate eq.
淡水水生生态毒性潜能	0.033 12	kgDCB eq.
温室效应潜能值 (GWP 100 年)	1.840 8	kgCO ₂ eq
温室效应潜能值 (GWP 100 年), EXL 生物碳	1.786 05	kgCO ₂ eq
人类毒性潜能值 (HTP inf)	1.286 92	kgDCB eq.
海水水生生态毒性潜能值 (MAETP inf)	518.252 64	kgDCB eq.
臭氧层消耗潜能值 (ODP, 稳态)	0	kgR11 eq.
光化学臭氧生成潜能值 (POCP)	0.000 49	kgEthene eq.
陆地生态毒性潜能 (TETP)	0.009 69	kgDCB eq.

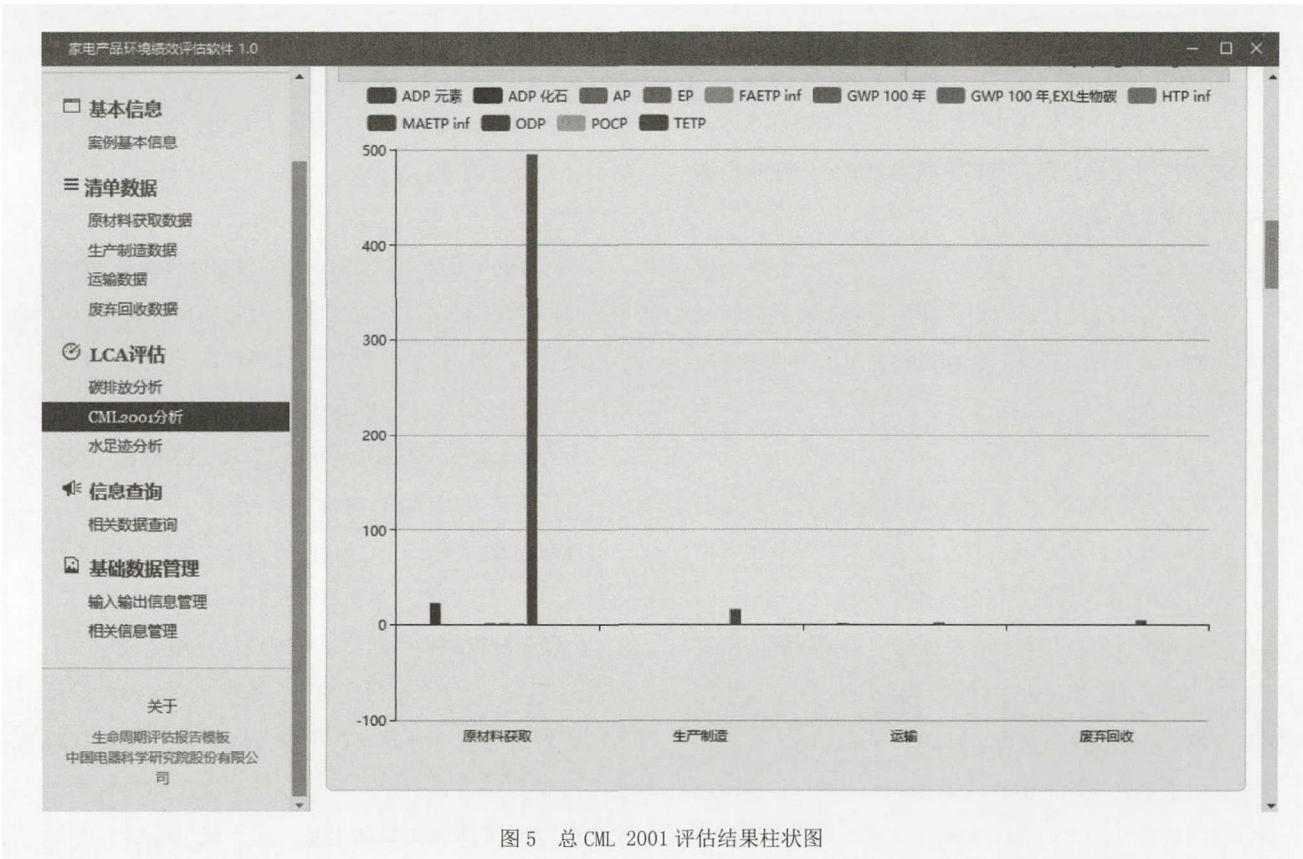


图 5 总 CML 2001 评估结果柱状图

实现了家用空调的分阶段分工艺环境性能评价,列出了家用空调外机高压阀部件生命周期各环节的碳排放和CML 2001柱状图,得出家用空调高压阀部件生命周期原材料获取阶段对环境的影响最大,并且提出准确的改进方案。

通过对家用空调外机高压阀部件生命周期分析,可以证明家电产品环境绩效评估软件能够根据不同类型家电产品的特点,调整评价参数,制定个性化的环境绩效评价方法和流程,计算出不同阶段不同工序对环境的影响,得到生命周期各环节的碳排放、CML 2001和水足迹结果,从而评估家电产品的环境绩效,为设计人员进行家电的绿色设计提供指导。

参考文献:

- [1] 2018年部分家电市场简析[J]. 电器, 2019(02):12.
- [2] Andrew Simons, Christian Bauer. A life-cycle perspective on automotive fuel cells[J]. Applied Energy, 2015: 157.
- [3] Kevin G. Harding. The motivation behind the papers "Availability of life-cycle assessment studies in (different countries)" [J]. The International Journal of Life Cycle Assessment, 2019, 24(10).
- [4] 龙苏华, 赵松岭. 汽车零部件生命周期评价研究[J]. 汽车零部件, 2019(07):50-53.
- [5] 钟言久, 阙欢迎, 刘阳. 聚酯树脂产品生命周期分析与评价系统[J]. 日用电器, 2019(07):71-76.
- [6] 吕杰锋, 徐文静, 姜杰. 共享单车生命周期评价对比分析[J]. 包装工程, 2019, 40(14):106-110.
- [7] 江志兰. 机电产品生命周期评价数据收集[J]. 绿色科技, 2016(06): 202-204.
- [8] 张雷, 陈志军, 刘志峰, 等. 家电产品生命周期评价边界界定研究[J]. 合肥工业大学学报(自然科学版), 2010, 33(03):327-332.

作者简介:

胡嘉琦(1978.12-), 男, 硕士研究生, 绿色制造专业, 高级工程师, 主要从事电器产品全生命周期绿色制造技术科研开发与应用推广工作。

(上接46页)

失效。滚抛处理使阀片边缘端面的直角转化为一定尺寸圆弧状,降低了阀片的应力集中程度,从而降低了阀片运行过程中的裂纹萌生概率。

3 结论

滚抛工序充分去除了压缩机阀片舌簧冲裁端面的微裂纹,抑制了疲劳裂纹的萌生;滚抛可显著平滑阀片的锋利边缘,降低其拍击时的应力集中程度。阀片滚抛处理后的疲劳寿命约为滚抛前的5倍。滚抛工序会使阀片产生轻微的加工硬化作用,同时去除了阀片表面的轧制条纹,但不会导致阀片的显微组织发生变化。

参考文献:

- [1] 付玉彬, 单向东, 宰学荣. 冰箱压缩机阀片断裂失效分析[J]. 材料开发与应用, 2008, 23 (5) :71-76.
- [2] 许竹桃, 关云, 黄海娥, 等. 不锈钢阀片断裂失效分析[A]. 中国金属学会. 第十届中国钢铁年会暨第六届宝钢学术年会论文集[C]. 北京: 冶金工业出版社, 2015: 1-5.
- [3] 孙振海, 范雪萍, 李鹏冲. 制冷压缩机阀片断裂失效分析[J]. 制冷与空调, 2013, 13 (7) :80-82.
- [4] A. C. ALTUNLU, I. LAZOGLU, E. OGUZ, et al. An investigation on the impact fatigue characteristics of valve leaves for small hermetic reciprocating compressors in a new automated test system[J]. Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures, 2012, 35(9):826-841.
- [5] Seong-woo Woo, Dennis L. O' Neal, Michael Pecht. Reliability design of a reciprocating compressor suction reed valve in a common refrigerator subjected to repetitive pressure loads[J]. Engineering Failure Analysis, 2010, 17(4):979-991.

作者简介:

肖鹏(1987.11~), 男, 硕士, 材料工程专业, 工程师, 主要从事压缩机材料研究与应用、零部件失效分析等工作。