

聚酯树脂产品生命周期分析与评价系统

Life Cycle Analysis and Evaluation System of Polyester Resin Products

钟言久¹ 阚欢迎¹ 刘阳²

(1. 合肥工业大学机械工程学院 合肥 233009;

2. 中国电器科学研究院股份有限公司 广州 510300)

摘要: 聚酯树脂是一种重要的工业生产原料, 然而很少有针对此类产品的生命周期评估系统。针对聚酯树脂生命周期环境影响分析, 本文在对聚酯树脂产品分析的基础上, 开发了基于生命周期理论的环境影响评估系统。首先分析了聚酯树脂产品生命周期边界, 确定了原材料获取、生产制造和运输三个阶段。在此基础上, 利用生命周期理论, 开发了聚酯产品生命周期评估系统, 实现了聚酯产品的分阶段分工艺环境性能评价, 为产品的环境改进提供指导。

关键词: 聚酯树脂; 生命周期分析; 评价系统

Abstract: Polyester resin is an important industrial production material, but there are few life cycle assessment systems for those products. Aiming at the environmental impact analysis of life cycle of polyester resin, this paper develops an environmental impact assessment system based on life cycle theory on the basis of the analysis of polyester resin products. Firstly, the life cycle boundary of polyester resin products was analyzed, and three stages of raw material acquisition, manufacturing and transportation were determined. Subsequently, a life cycle assessment system of polyester products was developed by using life cycle theory, which realized the environmental performance evaluation by stages and stages, and provided guidance for environmental improvement of products.

Key words: polyester resin; life cycle analysis; evaluation system

引言

近年来, 随着我国经济的快速发展, 各级政府对环境保护的重视程度也越来越高。同时, 颁布了一系列的法律法规对各行业的资源消耗进行了规范和限制, 如 2016 年四部委联合印发《绿色制造工程实施指南(2016–2020) 年》, 旨在降低资源消耗和环境污染, 提高资源能源的使用效率。在产品的生命周期各阶段, 产品的环境排放不仅仅局限于产品的生产阶段, 而是从原材料阶段到产品的回收处理各阶段均存在不同程度的环境排放。同时, 不同类型的产品通常来说评价方法也不尽相同。为了有效的评测和控制特定产品的环境排放, 有必要开发一种面向某类产品的基于生命周期理论的产品环境影响评价系统。

在产品生命周期评价工具方面, 国外生命周期发展较早, 已有相对的成熟的生命周期评价工具, 常用的生命周期评价工具包括 GABI、SimaPro 等。而国内相应的研究尚处于发展阶段, 刘继永根据机电产品生命周期特点, 进行面向机电产品生命周期分析的软件功能设计和数据库构建, 从而开发出评价工具^[1]。评价方法方面, 蒋诗新等利用 GaBi6 软件, 从原材料、生产、运输、使用、回收五个阶段对家用空调进行碳排放评估, 得到家用空调各阶段的碳排放量, 并分析出导致各阶段排放的主要原因^[2]。万腾方等针对钢铁行业的环境影响问题, 采用生命周期方法评价钢铁生产过程中的资源消耗和环境影响, 得出环境影响最大的 11 种物质, 并分析了各物质环境影响比重^[3]。张方文等针对定向刨花板生产过程,

开展基于生命周期的定向刨花板生产环境影响分析，得出生产过程中能源消耗和碳排放量^[4]。

由以上分析可知，在当前的研究当中，很少有针对聚酯树脂产品的生命周期分析，而聚酯树脂又是重要的工业原材料之一。因此，对聚酯树脂产品进行生命周期分析将会有效的降低环境排放。本文针对聚酯树脂产品生产特点，开发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。

1 聚酯树脂产品生命周期分析

生命周期分析是当前产品环境评价的主要方式之一，其主要是通过分析和量化产品生命周期过程中所消耗的原材料、能源等，计算出对环境的排放量，从而评价产品对环境的影响。在生命周期评价过程中，根据国际标准 ISO 14040 和 ISO 14044，生命周期评价步骤主要分为：

步骤一：评价对象和范围：评价对象和范围的确定是生命周期分析的首要环节，该步骤的主要目的是确定生命周期分析的研究对象，明确评价的主要功能单元、边界条件和评价阶段等。

步骤二：清单分析：在明确评价对象和范围之后，即可对聚酯树脂生命周期各阶段的输入输出数据进行分析；该步骤主要确定原材料、生产、回收等各阶段的物质和能量信息，为后续的评价提供数据支持。

步骤三：影响评价和结果解释：该步骤是生命周期

评价的最后一环，其主要目的是对清单数据和评价结果进行定性和定量的分析和描述，确定对环境影响最大的阶段，并提出相应的改进措施。

1.1 评价目标与范围确定

聚酯树脂是一种典型的化工原料，其主要参数指标包括外观、色度、反应性、软化点、酸值、熔体粘度和玻璃化转变温度等。根据 ISO 14041 标准，结合聚酯树脂产品特点，本文主要研究聚酯树脂生命周期中的三个阶段：原材料获取阶段、生产制造阶段和运输阶段，具体如图 1 所示。由图可以看出，在原材料获取阶段，主要包括原材料和能源物质两类，且这两部分均有相应的能源输入和废弃物排放；在生产制造阶段，主要包括聚酯生产加工和包装两个阶段；在运输阶段，不仅考虑到了产品到销售企业的运输，还考虑到了原材料到生产企业的运输，从而提高评价的准确性和可靠性。

1.2 清单分析与计算

根据生命周期理论，产品的环境排放总和等于生命周期各阶段排放量的累加。因此，根据所定义的聚酯树脂产品系统边界，本文在对聚酯树脂产品进行生命周期分析时，主要考察原材料获取、生产和运输三个阶段。通过对三个阶段进行分析，得出聚酯树脂产品对环境的排放总和。各阶段计算模型如下所示：

$$G = G_a + G_m + G_t \tag{1}$$

其中， G 表示聚酯产品生命周期的排放量， G_a 原材

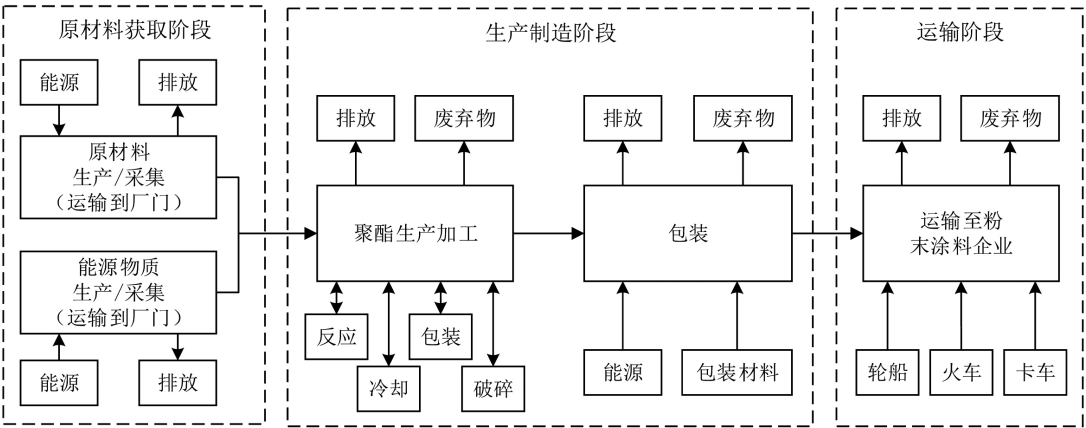


图 1 聚酯产品 LCA 系统边界

料获取阶段的排放量, G_m 表示聚酯产品在制造阶段的排放量, G_t 表示其在运输阶段的排放量。

1) 原材料获取阶段

聚酯产品在原材料获取阶段的排放可由式(2)计算得到:

$$G_a = \sum_{k=1}^h \left(\sum_{j=1}^m \frac{M_{kj} F_{Mj}}{n_{kj}} + \sum_{i=1}^n E_{ki} \cdot F_{Ei} + \sum_{l=1}^p C_{kl} \cdot F_{cl} \right) \quad (2)$$

其中, k 表示评价模块个数; j 表示原材料种类; M_{kj} 表示原材料消耗总量; F_{Mj} 表示生产排放系数; n_{kj} 表示原材料利用率; i 表示能源类别; E_{ki} 表示聚酯树脂所消耗的能源总量; F_{Ei} 表示该类能源的碳排放系数; l 表示气体种类; C_{kl} 表示温室气体排放量; F_{cl} 表示该类温室气体的二氧化碳排放当量。

2) 生产制造阶段

聚酯产品生产制造阶段的排放计算公式如式(3)所示:

$$G_m = \sum_{k=1}^h \sum_{i=1}^n C_{ik} \cdot EF_i + \sum_{p=1}^m O_p \cdot GWP_p \quad (3)$$

其中, k 表示生产单元, 由图1可知, 本文根据聚酯树脂生产工艺, 将生产过程划分为反应、冷却、破碎和包装四个阶段; i 表示消耗能源种类; C_{ik} 表示生产过程中所消耗的能源总量; EF_i 表示该类能源的排放系数; p 表示成产过程中排放的废气种类; O_p 表示废气排放总量; GWP_p 表示该类气体的全球变暖潜值。

3) 运输阶段

$$G_t = \sum_{i=1}^n (T_i \times D_i \times EF_i) \quad (4)$$

其中, i 表示交通工具种类, 在本文中, 主要有轮船、火车和卡车三种; T_i 表示此类交通工具单位距离的能源消耗量; D_i 表示运输距离; EF_i 表示所用能源的排放系数。

2 生命周期评价系统设计

本文根据对聚酯产品生命周期的分析, 结合聚酯产品的生产实际, 开发基于生命周期理论的聚酯产品生命周期评价系统。同时对系统架构和人机交互界面进行设计, 从而使得系统简单易用, 具有很好的实用价值。

2.1 系统架构设计

根据聚酯树脂产品具体生产过程和生命周期评价理论, 对系统架构进行设计, 具体如图2所示。由系统架构图可知, 该评估系统主要分为五个功能模块: 基本信息模块、数据查询模块、数据录入模块、生命周期评估模块和数据管理模块。

1) 基本信息模块

基本信息模块是该系统的首要模块, 该模块主要用于设定和查询出产品基本信息、生命周期阶段、生产制造工艺阶段等信息, 从而实现对聚酯产品的生命周期评估进行边界界定和模块设置。

2) 数据查询模块

数据查询模块主要用来对物质环境影响评价相关数据进行查询, 包括物质信息查询和相关法规查询两部分。物质信息查询包括原材料、能源等基础物质查询; 相关法规查询主要包括国家法律法规、行业标准和政策的查询。

3) 数据录入模块

数据录入模块是在基本信息模块确定生命周期评估阶段的基础上, 利用数据查询功能, 对聚酯树脂生命周期各阶段进行数据录入生命周期阶段数据的录入, 包括原材料获取阶段、生产制造阶段以及产品运输阶段三个阶段。

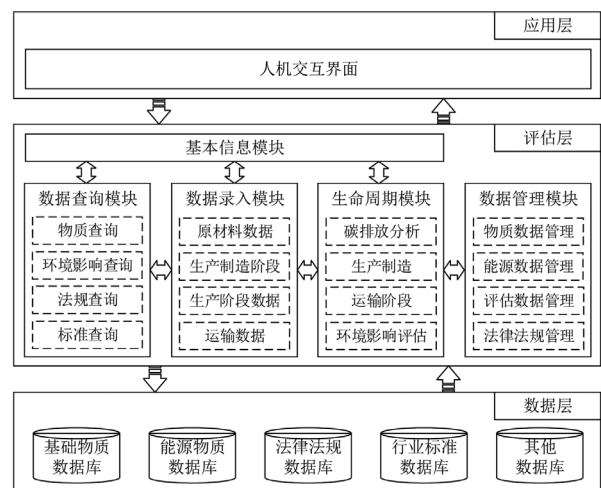


图2 聚酯树脂生命周期分析系统架构图

4) 生命周期评估模块

在聚酯产品各生命周期阶段数据录入的基础上,该模块主要对各阶段进行生命周期环境影响计算。在计算内容方面,分别对各阶段进行计算,包括碳排放分析和CML 2001 分析。在计算结果可视化方面,用户可以根据需要在分阶段和总评估方面,选择柱状图、饼状图、双饼状图和折线图等展示计算结果。

5) 数据管理模块

此模块主要是对物质环境影响等基础数据和法律法规等政策数据的查看、修改、添加和删除等,从而可以根据用户需求对数据库进行更新,保证数据可以根据用户需求进行更新和自定义,提高软件的适用性。

2.2 系统工作流程设计

系统工作流程是该聚酯产品生命周期评估过程的主要步骤,也是用户进行聚酯产品生命周期评估的主要步骤,具体流程如图 3 所示。由流程图可知,该聚酯产品生命周期评估系统主要分为六个步骤,具体如图 3 所示。

步骤 1: 目标和范围确定: 该步骤是评估的首要步骤。首先需要确定聚酯产品的评价目标和范围,包含评价指标、生命周期阶段和生产工艺过程等。

步骤 2: 原材料和能源数据导入: 在步骤 1 完成生命周期阶段定义后,对原材料获取阶段进行数据导入。主要依据聚酯产品的生产的具体原材料、能耗等数据添加。

步骤 3: 生产工艺数据导入: 该步骤主要是根据具体的制造工艺进行添加,一般包括包装、反应、冷却、破碎等工艺阶段。同时也可以对工艺阶段进行修改和添加。

步骤 4: 运输阶段数据导入: 该步骤主要包括两个阶段: 原材料运输至生产企业阶段和聚酯产品运输至销售客户阶段。同时根据具体的运输方式,将运输方式分为卡车、轮船、火车。

步骤 5: 生命周期分析与计算: 在完成以上数据导入步骤之后,即可进行环境影响计算。在分析指标方面,利用碳排放和 CML2001 两组标准进行环境影响分析。

步骤 6: 数据展示与导出: 在计算结果展示方面,通过饼状、柱状等图形进行展示,用户可以根据需求进行选择。同时,该系统具有评估报告导出功能,以方便用户使用。

3 系统验证与分析

本文选择某公司生产的聚酯树脂产品,对该评价系统进行验证和分析。该聚酯树脂产品生命周期阶段为原材料获取、生产制造和运输阶段,不考虑该产品的使用和回收过程,其中,各阶段所消耗的原材料和能耗不考虑品牌和地区。为提高数据收集和系统评价结果的准确性,本文所采用的数据均为生产 1 000 kg 聚酯树脂产品所消耗能源和物质数量。

在原材料获取阶段,聚酯树脂生产所需要的主要原材料数据见表 1 所示。在此阶段中,主要考虑的原材料包括新戊二醇、己二酸、对苯二甲酸、丙二醇、间苯二甲酸、单丁基氧化锡、抗氧化剂(酚类)七类。其余原材料由于比例较少,因此在本次评估中未考虑其他材料。

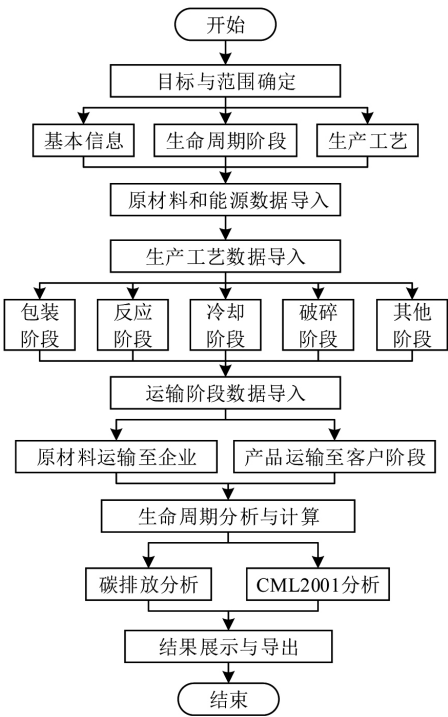


图 3 聚酯产品生命周期评估系统工作流程

在聚酯树脂产品的生产制造阶段，主要包括酯化、脱水、酸解、减压缩聚、加助剂、过滤、冷却、破碎和包装等生产工艺。在本文中，为提高能耗数据测量的准确性，将酯化工艺、酸解工艺和减压缩聚工艺融合为一个评估工艺。由于加助剂和过滤工艺所消耗的能耗较低，在本次评估中忽略不计。因此，在本次评估中，主要包括酯化－酸解－缩聚、冷却、破碎和包装四大生产工艺阶段，具体能耗数据见表 2 所示。

在运输阶段，本次评估考虑原材料到生产企业和产品到销售企业的运输两个部分。在原材料运输阶段，主要运输新戊二醇、己二酸、对苯二甲酸、丙二醇、抗氧化剂（酚类）五类物质，间苯二甲酸和单丁基氧化锡的运输暂不考虑。在产品到销售企业的运输类别中，选取典型的三个销售企业作为评估对象。两类运输均采用预设的轮船、卡车和铁路运输，具体运输方式和运输距离见表 3 所示。

在完成聚酯产品各阶段数据收集之后，根据聚会产品的具体信息，对评价系统进行基本信息设置。在本次评估中，将生命周期评估阶段设置为原材料获取、生产制造和运输三个阶段。其中，在生产制造工艺中，添加酯化－酸解－缩聚、冷却、破碎和包装四个工艺阶段。生命周期评估系统及参数设置如图 4 所示。

在完成基本信息设置之后，将以上给出的聚酯产品各阶段数据添加到系统中，即可得到聚酯树脂环境分析结果。碳排放分析结果如图 5 所示，由图可知，总碳排放总量为 17.012 36 [kg CO₂ eq.]。其中，原材料获取阶段排放量为 2.670 96 [kg CO₂ eq.]，制造阶段排放量为 13.797 38 [kg CO₂ eq.]，运输阶段排放量为 0.544 02 [kg CO₂ eq.]。由此可知，制造阶段对环境的影响最大，有必要对产品的生产工艺进行优化。

图 6 所示结果为聚酯产品生命周期 CML2001 分析结果。由该图可知，非生物资源（ADP 化石）排放总量为 214.253 7 [MJ]，酸化潜能值（AP）排放总量为 0.075 25 [kg SO₂ eq.]，富营养化潜能值（EP）总排放量为 0.004 93 [kg Phosphateeq.]，淡水水生生态毒性潜能值

（FAETP inf）总排放量为 0.371 91 [kg DCB eq.]，温室效应潜能值（GWP 100 年）总排放量为 17.012 36 [kg CO₂ eq.]，温室效应潜能值（GWP 100 年）EXL 生物碳总排放量为 17.101 14 [kg CO₂ eq.]，人类毒性潜能值（HTP inf）总排放量为 90.022 95 [kg DCB eq.]，海水水生生态毒性潜能值（MAETP inf）总排放量为 24 572.211 30 [kg DCB eq.]，光化学臭氧生成潜能值（POCP）总排放量为 0.005 17 [kg Ethene eq.]，陆地生态毒性潜能（TETP）总排放量为 0.039 41 [kg DCB eq.]。

表 1 聚酯产品原材料组成

材料名称	材料英文名称	材料用量(kg)
新戊二醇	Neo amyl glycol	396
己二酸	Adipic acid	27
对苯二甲酸	Terephthalic acid	569
丙二醇	Propylene glycol	58
间苯二甲酸	Isophthalic acid	101
单丁基氧化锡	Monobutyltin oxide	0.9
抗氧化剂（酚类）	Antioxidants (phenols)	5.76

表 2 生产过程能耗使用数据

生产工序	能源类型	能源用量
1) 酯化：加热 + 通氮气 + 脱水；	电力	147.85 (kwh)
2) 酸解：加热；	天然气	79.1 (m ³)
3) 缩聚：加热 + 抽真空；	水	1.6 (t)
冷却	电力	21 (kwh)
破碎	电力	4.68 (kwh)
包装	电力	0.84 (kwh)

表 3 原材料和产品运输阶段数据

类型	产品名称	运输方式	运输距离
原材料运输	新戊二醇	轮船运输	1 500 km
	己二酸	卡车运输	100 km
	对苯二甲酸	卡车运输	400 km
	丙二醇	卡车运输	30 km
	抗氧化剂（酚类）	卡车运输	30 km
产品运输	聚酯产品	卡车运输	500 km
	聚酯产品	轮船运输	2 800 km
	聚酯产品	铁路运输	1 500 km



图4 聚酯树脂产品生命周期评价系统

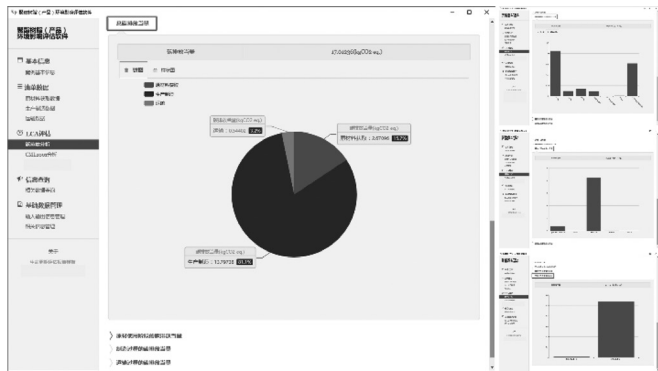


图5 聚酯产品碳排放分析结果图

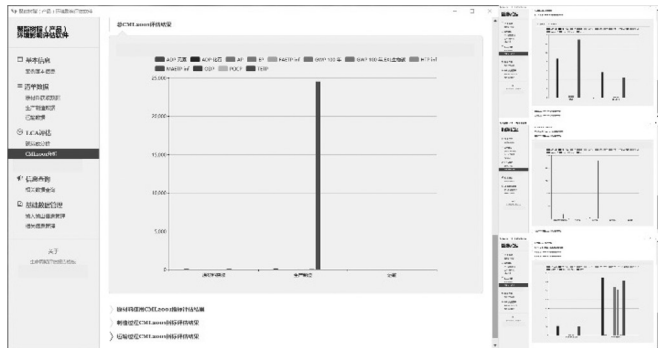


图6 聚酯产品 CML2001 分析结果图

4 结论

本文主要针对聚酯树脂产品的生产和销售特点，开发了基于生命周期理论的聚酯树脂产品环境评价系统。该系统可以根据聚酯产品的生命周期阶段和特定生产工艺进行分析，分别计

算出不同阶段和不同生产工艺的环境影响。在影响结果分析方面，采用碳排放和 CML2001 指标体系对评价结果进行分析。通过该系统，可以有效地判定聚酯产品在原材料、生产和运输各阶段环境影响，为聚酯产品的后期改进提供指导。

参考文献：

[1] 刘继永. 机电产品全生命周期评价系统的研究 [J]. 机电产品开发与创新, 2014, 27(6):84-86.
[2] 蒋诗新, 田晓飞, 王玲, 等. 家用空调全生命周期碳足迹分析 [J]. 日用电器, 2016(9):46-52.
[3] 万腾方, 戴方钦, 雷体新. 基于生命周期评价方法的武钢钢铁产品环境影响评估 [J]. 工业安全与环保, 2018.
[4] 张方文, 张亚慧, 于文吉. 基于生命周期评价的 OSB 生产环境影响分析 [J]. 木材工业, 2017, 31(5):22-26.

作者简介：

钟言久 (1993-), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为产品概念设计与先进制造。