

知识介绍

# 化工产品生命周期设计的理论和方法

闫志国 钱宇

(华南理工大学化工学院, 广东 广州 510640)

**摘要:** 生命周期评价(LCA)和生命周期成本分析(LCC)是实现化工产品和过程清洁生产两大支持工具。分别介绍了生命周期评价和生命周期成本的内涵和特征,提出了产品生命周期设计(LCD)的概念和实施步骤,有助于设计人员做出正确的决策,开发出环境友好、经济节约的产品。

**关键词:** 生命周期设计;生命周期评价;生命周期成本

中图分类号:TQ-9

文献标识码:A

文章编号:0253-4320(2004)08-0063-03

## Theory and method of life cycle design for chemical products

YAN Zhi-guo, QIAN Yu

(School of Chemical Engineering, South China University of Technology, Guangzhou 510640, China)

**Abstract:** Life cycle assessment (LCA) and life cycle costing (LCC) analysis are two available decision-making tools to carry out cleaner chemical production and sustainable development. The meanings and characteristics of the two tools were presented respectively, the concept of life cycle design (LCD) was put forward and the procedure was expatiated. The correct decision and development of environment friendly products could be made by using these methods.

**Key words:** life cycle design; life cycle assessment; life cycle costing

传统的环境技术主要针对生产过程污染物的末端治理,不能从根本上实现对环境的保护。要彻底解决环境污染问题,必须从源头上进行治理。要同时考虑产品整个生命周期各个阶段对环境的影响,最大限度地利用原材料和能源,减少有害废物和固体、液体、气体的排放,改进操作安全,减轻对环境的污染,选取对环境和人类危害小的替代产品。美国工程院院士 Grossmann 指出,可持续发展和环境问题非常重要,但是对过程系统工程研究的努力程度还远远不够,需要开发更具创造性的方法和工具,化工产品和过程相互作用以及化工产品生命周期分析将成为一个研究机会和挑战<sup>[1]</sup>。另一方面,提高产品使用性能和降低产品成本始终是工业技术研究开发的重要目标。但是,降低成本不是一个孤立过程,成本分析不应仅仅局限在对生产成本的估测上,而应贯穿产品的全生命周期。笔者从生命周期评价(LCA)入手,综合分析生命周期成本(LCC),介绍生命周期设计(LCD)的概念和实施步骤,有助于化工产品研发和设计人员做出正确的决策,开发出环境友好、经济节约的产品。

## 1 生命周期评价<sup>[2]</sup>

1997年,国际标准化组织根据生命周期评价的思想,把生命周期评价过程分为目标范围的界定、数据清单分析、环境影响评价和改进分析4个步骤<sup>[3-5]</sup>。各个子系统的关系如图1所示。

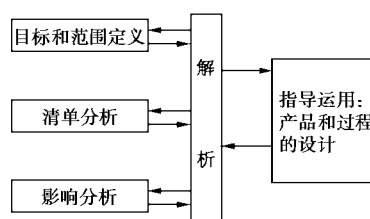


图1 生命周期评价技术框架

生命周期评价首先是确定评价范围,即目标和范围的定义,确定了评价范围也就确定了系统的边界。数据清单分析的目的是将环境负荷量化,即将一个产品从生产、使用到废弃整个生命过程中投入的所有原材料和能源作为输入逐一列出,而将在这个过程中排放出的所有影响环境的物质作为输出也逐一列出,对输入和输出进行以数据为基础的客

收稿日期:2004-06-04

基金项目:国家自然科学基金(20376025)项目及国家杰出青年基金(202225620)项目

作者简介:闫志国(1975-),男,博士生;钱宇(1957-),男,博士,教授,博士生导师,主要从事化工系统工程、产品和过程集成设计研究,通讯联系人,020-87112046,ceyuqian@scut.edu.cn。

量化分析,该分析应贯穿于产品的整个生命周期过程。

经环境影响评价得到在产品生命周期全过程客观量化的环境影响数值之后,就能得到一个指标来表征被评价过程造成的环境负荷。其基本步骤可分为 3 步:分类、计算和赋值。分类是指对不同的环境损害类型进行分类;计算是将与各环境损害项相联系的目录项目进行汇总,定量计算造成的各种环境损害的大小,这个量化过程是人为规定的,它依赖于广泛的科学知识;赋值是由专家规定各种环境损害的权重,与前面得到的各种环境损害大小加权求和,从而得出一个指标来表示被评价过程造成的环境负荷。

解析是生命周期评价的最终目标,通过确定产品的环境负荷,比较产品的环境性能优劣,可对产品进行重新设计、不断完善和改进,这种分析包括定量和定性的改进措施,以期得到产品对环境的影响程度最小的方案。

## 2 生命周期成本分析

传统的技术经济学考虑的只是单纯的生产成本,对产品整个周期各个阶段费用相互影响的分析不够,缺乏对产品生命周期成本的决策。笔者引入生命周期成本分析来进一步剖析生产成本与生命周期成本之间的关系。

生命周期成本是指产品从出现到消亡所涉及的所有费用。笔者把它分为 2 个部分:一部分是传统意义上的生产成本,包括原料的准备和生产操作费用,就是在产品生命周期的原料准备和生产阶段的费用,称为上游成本。另一部分是指在产品的使用时产生的附带费用和废弃处理费用,也就是生命周期后 2 个阶段的费用,称为下游成本,二者之和构成了产品的整个生命周期成本,其结构如图 2 所示。

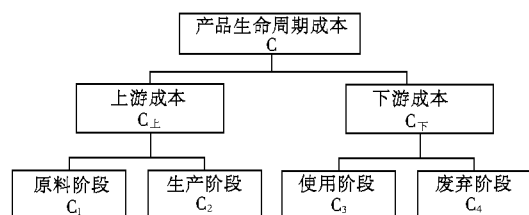


图 2 生命周期成本结构

## 3 化工产品的生命周期设计

生命周期设计是指在产品设计阶段权衡考虑产

品在整个生命周期不同阶段的环境问题和经济因素<sup>[6-8]</sup>。为了取得良好的生态效果和经济效益,设计者应该在考虑产品在整个生命周期产生的费用的同时,也考虑产品对环境的影响贯穿于生命周期的各个阶段。Alting 提出将产品的生命周期划分为 6 个阶段:需求识别、设计开发、制造、运输、使用以及废弃<sup>[9]</sup>。Zust 等人进一步将产品的生命周期划分为 4 个阶段:产品开发、产品制造、产品使用及产品处置<sup>[10]</sup>。笔者从原料准备、生产过程、使用和废弃 4 个阶段来考虑化工产品的生命周期设计。

### 3.1 原材料准备和选择

在实施生命周期设计的原料准备阶段,要求原材料在满足一般功能要求的前提下,应具有良好的环境兼容性,以便产品在制备、使用以及用后处置等生命周期的各阶段具有最大的资源利用率和最小的环境影响。生命周期设计要求选择原材料应遵循以下原则:①优先选用可再生材料,尽量选用可回收材料,提高资源利用率,实现可持续发展;②尽量选用低能耗、少污染的材料;③尽量选择环境兼容性好的材料,避免选用有毒、有害和有辐射特性的材料。所用材料应易于回收、再利用、再制造或易于降解。

### 3.2 生产工艺和流程的确定

化工产品制造阶段应该采用绿色工艺实现绿色制造,绿色工艺与清洁生产密不可分。清洁生产要求对产品及其工艺不断实施综合的预防性措施,其实现途径包括清洁材料、清洁工艺和清洁产品。绿色工艺是指既能提高经济效益,又能减少环境影响的工艺技术。它要求在提高生产效率的同时必须兼顾削减或消除危险废物及其他有毒化学品的用量,改善劳动条件,减少对操作者的健康威胁,并能生产出与环境兼容的安全产品。在经济方面应采用费用相对最小的工艺流程。

### 3.3 使用阶段的设计

在这个阶段,对设计者而言,产品的功能和性能是主要因素,在实现其功能的过程中伴随着物料消耗、有害气体的释放和对人体的影响。就产品对环境的友好功能而言,在设计阶段应该考虑到能量的有效性,减少废物排放,提高产品利用率,减少生产成本,同时在保证性能的前提下,使其生命周期尽可能地延长。

### 3.4 废弃阶段的设计

目前已经有一些研究报道了关于描述废物管理的生态设计策略<sup>[11]</sup>,比较典型的有再利用、再制造和再回收策略。废物再利用和回收是指把一种产品

使用后的废品回收再利用或者作为生产其他产品的原料。这体现了循环经济的思想,同时节约了成本,防止环境受到更大危害。

#### 4 案例分析

利用相对丰富的煤资源生产汽车代用燃料,根据能源状态可分为煤制甲醇、煤合成油和煤发电。不同的燃料生产路线与相应的汽车组成完整的生命周期链,对这些生命周期链进行分析,确定哪条链具有优势,从而为未来汽车和相应的燃料发展方向提供决策依据,是此生命周期研究的目的。

根据汽车燃料的特殊性,它的生命周期成本只涉及从原料阶段到使用阶段的费用,废弃阶段的费用忽略不计,可以得到不同燃料的生命周期成本,见表1。

表1 不同燃料的生命周期成本

|        | 汽油成本/<br>美元·L <sup>-1</sup> | 甲醇成本/<br>美元·L <sup>-1</sup> | 合成油成本/<br>美元·L <sup>-1</sup> | 电成本/<br>美元·(kW·h) <sup>-1</sup> |
|--------|-----------------------------|-----------------------------|------------------------------|---------------------------------|
| 原料阶段   | 0.081                       | 0.022                       | 0.075                        | 0.187                           |
| 生产阶段   | 0.021                       | 0.036                       | 0.220                        | 0.380                           |
| 使用阶段   | 0.021                       | 0.016                       | 0.016                        | 0.008                           |
| 生命周期成本 | 0.124                       | 0.064                       | 0.113                        | 0.233                           |

由表1可知,单位质量的燃料中电的生命周期成本最高。为了进一步更清楚对比各个产品经济的优劣性,假设汽油车每百公里耗油7.5 L,以甲醇为燃料的汽车是以85%甲醇和15%汽油混合的灵活燃料汽车,其每百公里消耗燃料12.5 L,合成油每百公里的耗油量为9.8 L,电动汽车是镍氢电池电动车,其每百公里电耗为26 kW·h。据此计算,在达到同样效果的前提下,用煤基甲醇是最经济的,煤基发电的成本约是甲醇的8倍。

另一方面,同时对各种燃料对环境的影响进行生命周期评价。以每条链在生命周期整个过程中的废气排放量为例,由于行驶同样路程所需不同燃料的量是不同的,仍以行驶每百公里所需燃料在生命周期排放的废气为依据。把各个阶段的排放进行汇总,采用环境负荷计算公式:

$$\text{污染物排放} = \sum_i^4 \text{阶段污染排放}$$

$$EB = (W_a \times PF_a) + (W_b \times PF_b) + (W_c \times PF_c) + \dots$$

式中,EB指环境负荷;a、b、c为排放物中所含

的各种化学物质;W为各物质的质量;PF为各物质对某类环境所造成影响的潜能因子(采用英国ICI公司研究使用的潜能因子),得到的各种信息见表2。

表2 燃料的生命周期评价

|     | 二氧化碳<br>排放量 <sup>①</sup> /kg | 二氧化硫<br>排放量 <sup>①</sup> /kg | 一氧化碳<br>排放量 <sup>①</sup> /kg | 氮化物<br>排放量 <sup>①</sup> /kg | 环境<br>负荷 |
|-----|------------------------------|------------------------------|------------------------------|-----------------------------|----------|
| 汽油  | 36.36                        | 0.11                         | 0.17                         | 0.05                        | 41.36    |
| 甲醇  | 38.45                        | 0.08                         | 0.06                         | 0.03                        | 40.45    |
| 合成油 | 43.50                        | 0.12                         | 0.06                         | 0.05                        | 46.78    |
| 电   | 31.50                        | 0.31                         | 0.01                         | 0.02                        | 32.32    |

注:①是指每百公里所需的汽油、甲醇、合成油及电燃料在生命周期的对应废气排放量。

由表2可以看出,对大气污染而言,电所产生的环境负荷最小,合成油对环境影响最为严重。仅考虑环境影响因素,电是最佳的选择。但是由于发电的成本远远高于其他燃料,所以必须权衡多种因素做出选择。从生命周期设计的角度出发,对几种产品的环境性能和经济性能进行综合评价。甲醇所产生的环境负荷较低,而且主要集中在二氧化碳的排放上,在设计工艺流程时可以选择尽可能避免产生二氧化碳的路线。

#### 参考文献

- [1] Grossmann I E. Challenges in the new millennium: product discovery and design, enterprise and supply chain optimization, global life cycle assessment[A]. In: Chen B Z, Westerberg A W. The Proceeding of the 8th International Symposium on PSE[C]. Amsterdam: Elsevier, 2003. 28-48.
- [2] Geisler G, Hofstetter T B, Hungerbuhler K. [J]. International Journal of Life Cycle Assessment, 2004, 9(2): 101-113.
- [3] Brett A, Geoff B, Jim P. [J]. Computers and Chemical Engineering, 2000, 24(8): 1195-1200.
- [4] Azapagic A, Clift R. [J]. Journal of Cleaner Production, 1999, 7(3): 135-143.
- [5] Nielsen P, Wenzel H. [J]. Journal of Cleaner Production, 2002, 10(3): 247-257.
- [6] Bakshi B R. [J]. AIChE Journal, 2003, 49(6): 1350-1358.
- [7] Rittenhouse D. [J]. Chemical Engineering Progress, 2003, 99(3): 32-40.
- [8] Adisa A. [J]. Chemical Engineering Journal, 1999, 73(1): 1-21.
- [9] Alting I. [J]. Challenge for Manufacturing Enterprises, 1991, (9): 8-17.
- [10] Zust R, Wagner R. [J]. Annals of the CIRP, 1992, 41(1): 473-476.
- [11] Steen B. [J]. Journal of Cleaner Production, 1997, 5(4): 255-262. ■