

# 考虑回收能力的材料生命周期清单分析模型

苏 醒<sup>1,2</sup>, 张 旭<sup>1</sup>, 孙永强<sup>1</sup>

(1. 同济大学 暖通空调及燃气研究所, 上海 200092; 2. 同济大学 环境科学与工程学院, 上海 200092)

**摘要:** 对可再生材料进行生命周期清单分析时, 需要考虑材料回收率的影响. 分析了以往几种可再生材料生命周期清单分析算法所存在的问题, 将回收率分解为回收能力、回收水平 2 个因素, 提出了同时考虑这 2 个因素的可再生材料生命周期清单分析新算法. 以建筑中常用的钢板、钢筋、铝、玻璃及混凝土为例, 比较计算了新算法与老算法之间的差异. 结果表明, 新算法能较大提高生命周期清单分析的计算精度.

**关键词:** 生命周期评价; 可再生材料; 清单分析; 回收能力; 回收水平

**中图分类号:** TU 513

**文献标识码:** A

## A New Algorithm for Life Cycle Inventory Analysis of Reproducible Materials

SU Xing<sup>1,2</sup>, ZHANG Xu<sup>1</sup>, SUN Yongqiang<sup>1</sup>

(1. HVAC & Gas Institute, Tongji University, Shanghai 200092, China;  
2. College of Environmental Science and Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China)

**Abstract:** Recovery rate should be taken into account when life cycle inventory of reproducible materials is analyzed. The existing problems of past algorithms are discussed. The recovery rate is separated into recovery capacity and recovery level, and a new algorithm contains these two factors for life cycle inventory analysis of reproducible materials is proposed. The difference between each algorithm is calculated with the steel plate, steel reinforcement, aluminum, glass and concrete for instance. It shows that new algorithm is more accurate than others.

**Key words:** life cycle assessment; reproducible material; inventory analysis; recovery capacity; recovery level

也是产品或系统生命周期清单分析最主要的敏感因素, 其清单分析结果的准确度直接影响着产品或系统生命周期评价结果的可靠性<sup>[1]</sup>. 而在材料的生命周期清单分析中, 许多材料是具备回收能力的, 例如建筑材料中的玻璃、钢材等. 从已有的可再生材料生命周期清单分析研究来看, 由于不同的学者采用不同的计算方法, 研究结果之间差异较大, 这关系到材料相关的环境影响和资源消耗评价预测工作的科学性, 也直接导致在材料筛选的时候会产生不同的判断.

由于可再生材料的特殊性, 可再生材料的生命周期可以分为广义的生命周期和具体的生命周期 2 种. 具体的生命周期是指材料从生产到用于某一个产品, 一直到产品到期后再运输到材料生产加工厂; 广义的生命周期则可理解为材料从最初的原生材料生产到服务于多个产品直到材料损耗至零.

按照材料的时间序列进行生命周期清单分析时, 材料在特定产品或系统寿命到期后所进入的下一个生命周期系统是未知的, 且预计的回收比例、回收能力也都是未知的, 甚至其在当前系统中的来源也是不确定的. 例如, 研究者很难判断一幢建筑所用的钢材中有多少比例是原生钢, 有多少是废钢再生而成的, 也无法判断建筑寿命到期后多少钢材是会回收的. 在以往的可再生材料生命周期清单分析中, 存在着多种不同的算法, 而且各算法之间存在着较大差异, 这导致决策者在材料筛选过程中会出现截然相反的结论. 本文将逐一分析以往各算法所存在的问题, 并提出一种相对合理的算法.

## 1 可再生材料生命周期流程

图 1 列出了可再生材料的生命周期流程, 最初是原生材料生产过程, 原材料生产又包括矿物开采、

产品或系统由多种材料组合或加工而成, 材料生命周期清单分析是产品或系统生命周期评价的基础,

收稿日期: 2010-07-29

基金项目: 国家自然科学基金(50578113)

第一作者: 苏 醒(1982—), 男, 博士后, 主要研究方向为建筑生命周期评价及有效性分析. E-mail: cc8801314@163.com

运输、生产过程,然后运输到某个产品(或系统)加工所在地成为产品(或系统)的一部分,产品(或系统)寿命到期后拆解,废旧材料又运输到材料生产厂,通过回收再生又进入下一个产品的生命周期,成为一个循环系统.在已有的相关研究中,原生材料上游开采、运输及生产过程的生命周期清单分析已非常明确,各学者的清单分析模型都大致相同,只是参数因为空间、时间的不同可能存在一定的出入.

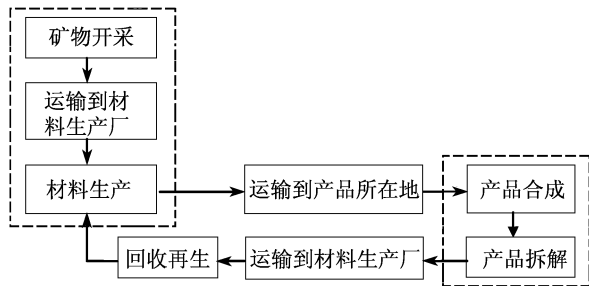


图 1 可再生材料生命周期流程图

Fig.1 Research flow of reproducible materials life cycle

为了分析方便,分别对材料生命周期各个阶段的能耗  $E$  和排放  $P$  进行定义,生命周期各阶段均采用单位质量作为功能单位.原生材料生产过程生命周期(图 1 左边虚框部分)能耗及排放分别为  $E_A$  和  $P_{Ai}$ ,运输到产品所在地过程的生命周期能耗和排放分别为  $E_B$  和  $P_{Bi}$ ,产品寿命到期后运输到材料生产厂的生命周期能耗和排放分别为  $E_C$  和  $P_{Ci}$ ,回收再生过程的生命周期能耗和排放分别为  $E_D$  和  $P_{Di}$ .其中,下标  $i$  为排放种类.

## 2 以往计算方法存在的问题

通过查阅相关研究文献,可再生材料生命周期清单分析计算方法有很多种,以下以可再生材料生命周期能耗计算过程为例逐一进行分析.

方法 1 不考虑材料可回收性能,全部当做原生材料来处理.这种方法在已有文献中非常多见<sup>[2-3]</sup>,其生命周期过程由原材料生产加上运输到产品所在地组成.此方法计算结果是  $E_A + E_B$ ,其错误是显而易见的,不能体现材料可再生性能对优化材料生命周期环境性能的贡献.

方法 2 材料全部当做原生材料,但是考虑材料是可回收的,当产品寿命到期后,材料需要运回材料生产加工厂,因此其生命周期过程为原生材料生产加上一次运输再加上回收运输<sup>[4]</sup>.此方法计算结果为  $E_A + E_B + E_C$ ,远远大于实际情况,不仅不能体现

材料可再生性能的优越性,甚至会得到完全错误的结论,而且也没有考虑回收率大小的影响.

方法 3 考虑了回收率的影响,采用材料一次生产的物化能耗减去预计回收后的材料能耗进行计算,回收率一般都采用全国平均回收水平数据或者假设数据,结果为  $E_A + E_B - \lambda E_A$  ( $\lambda$  为回收率)<sup>[5]</sup>.这种计算方法的问题在于将材料全部按照原生材料考虑,而且没有考虑材料再生前的运输过程及再生过程的能耗影响.

方法 4 考虑了回收率的影响,也考虑了回收运输过程及再生过程的影响,但是没有考虑再生成材率的影响.按照这种方法计算出来的可再生材料生命周期能耗结果为  $E_A + E_B + \lambda E_C + \lambda E_D - \lambda E_A$ <sup>[6]</sup>.这种算法存在两大问题,一是在特定产品中完全按照原生材料处理,二是没有考虑再生成材率,实际中可再生材料的再生过程成材率均低于 100%.

方法 5 考虑到特定产品中的材料可能不全是原生材料,用材料的全国平均回收率作为再生材料所占比例计算材料的生命周期能耗<sup>[7-8]</sup>.具体的计算方法为  $(1 - \lambda)E_A + \lambda E_D + E_B$ .这种算法也存在两大问题,一是没有考虑材料再生成材率,二是没有考虑回收之前的运输过程影响.

## 3 本文计算方法

由于大部分生命周期评价在产品的设计阶段进行,产品中可再生材料来源里一次开采的部分难以确定,其生命周期能耗和排放可采用此材料广义寿命周期内的平均水平计算.

在材料的回收处置阶段,回收能力和回收水平是 2 个不同的概念,在此引入综合回收率  $\eta$

$$\eta = \alpha\beta$$

式中: $\alpha$  为回收能力,即单位质量某材料回收后得到的此材料质量,也称再生成材率; $\beta$  为某材料在我国的整体回收水平,即回收材料使用量占此材料所有使用量的比例.

分析图 1 中右边虚框部分,产品合成和产品拆解过程的能耗和排放与产品种类密切相关,对具体产品可以进行具体分析,不能算在材料生命周期里.按图 1 所示,可再生材料生命周期是一个无限循环系统,实际回收率不可能是 100%,每次回收时,材料都会有一定的损失,因此循环最终可以收敛,也就是说可再生材料广义的生命周期也是有时间边界的.广义的生命周期由无数个狭义的生命周期组成,如

果原生材料以单位质量为功能单位,广义生命周期时间跨度里,材料所产生实际功能的质量肯定要大于 1 个单位,1 个单位质量原生材料广义寿命周期里提供的实际功能质量 $\sum m_i$  为

$$\sum m_i = 1 + \eta + \eta^2 + \cdots + \eta^n$$

可再生材料广义生命周期里的总生命周期能耗 $\sum E_i$  为

$$\begin{aligned} \sum E_i = & E_A + (E_B + \beta E_C + \eta E_D) + \eta(E_B + \\ & \beta E_C + \eta E_D) + \eta^2(E_B + \beta E_C + \eta E_D) + \\ & \cdots + \eta^n(E_B + \beta E_C + \eta E_D) \end{aligned}$$

综合回收率肯定小于 1,因此可以计算出广义生命周期里的单位质量生命周期能耗 $\bar{E}$  为

$$\bar{E} = \sum E_i / \sum m_i = E_A - \eta E_A + E_B + \beta E_C + \eta E_D$$

同样,可再生材料生命周期环境排放也可采用以上方法计算,限于篇幅,此处不再详述.同前文分析的其他几种计算方法相比,本文方法能够同时体现回收水平和回收能力的不同影响.

4 案例分析

铝材、玻璃、钢材、砖块是常规建筑中最常用的 4 种材料,前 3 者的回收能力较高,砖块的回收能力较低.本文以铝材、玻璃、钢筋、钢板和混凝土砌块的生命周期能耗为例,分别计算各种算法下的结果,并比较分析不同算法之间的差异.表 1 列出了这 5 种建材的回收能力和整体回收水平.根据各类建材一次生产能耗、再生能耗、回收过程运输距离的数据,并结合生命周期清单分析数据库(能耗、运输等数据均来源于国家统计局年鉴的平均水平)进行迭代计算,可以得到各种计算方法下的结果,具体见表 2.

表 1 铝材、玻璃、钢材、混凝土砌块的回收能力和整体回收水平

Tab. 1 Recovery capacity and recovery level of steel plate, steel reinforcement, aluminum, glass and concrete %

材料类型	回收能力	回收水平	综合回收率	数据来源
铝材	100	80	80.0	文献[9]
玻璃	90	13	11.7	文献[9-10]
钢筋	94	50	47.0	文献[10]
钢板	94	90	84.6	文献[10-11]
混凝土砌块	60	20	12.0	文献[12-13]

表 2 不同计算方法建材生命周期能耗比较

Tab.2 Comparison of building materials life cycle energy consumption under different algorithms GJ·t<sup>-1</sup>

材料类型	方法 1	方法 2	方法 3	方法 4	方法 5	本文方法
铝材	172.40	173.03	34.98	54.25	53.63	54.25
玻璃	19.26	19.51	16.79	17.30	17.05	17.50
钢筋	26.52	27.15	13.57	19.04	18.41	19.51
钢板	26.52	27.15	3.22	13.06	12.43	13.90
混凝土砌块	1.36	1.48	1.12	1.17	1.07	1.27

从表 2 的计算结果可以看出,各种方法计算出来的结果差异非常大,即使是考虑了回收的不同计算方法误差也较大,有的甚至达到 5 倍.由于铝材、玻璃、钢材的回收能力都很高,因此方法 4 的计算结果与本文方法差距不大,但是对于回收能力较低的产品,如混凝土砌块,方法 4 与本文方法也会出现较大误差,差异约 9%.如果混凝土的整体回收水平进一步升高,这个差异也会更加明显.因此,按照建材广义寿命周期内平均水平计算能够提高生命周期清单分析结果的可靠性.

5 结语

本文分析了以往一些对可再生材料生命周期清单分析方法所存在的问题,提出了可再生材料广义生命周期的概念,并基于此建立了一种新的计算模型.新算法能够同时反映材料的回收水平和回收能力对材料生命周期清单分析的影响.从选取案例分析的结果来看,回收能力和回收水平均与材料生命周期清单分析结果密切相关.为提高结果的可靠性,在材料生命周期清单分析中需要同时考虑这 2 个因素.

参考文献:

[ 1 ] 苏醒. 建筑物生命周期清单分析的有效性研究[D]. 上海: 同济大学机械工程学院, 2010.  
SU Xing. Study on validity of building life cycle inventory analysis [ D ]. Shanghai: Tongji University. College of Mechanical Engineering, 2010.

[ 2 ] Lee K M, Park P. Application of life-cycle assessment to type III environmental declarations[J]. Environmental Management, 2001, 28(4): 533.

[ 3 ] Venkatarama Reddy B V, Jagadish K S. Embodied energy of common and alternative building materials and technologies[J]. Energy and Buildings, 2003, 35(2): 129.