

文章编号: 1009-6094(2015)02-0222-06

## 基于新数据分配法的线路板 生命周期清单分析\*

胡新燕<sup>1</sup> 陈雁<sup>2</sup> 颜锡春<sup>3</sup> 戴科伟<sup>2</sup>

(1 南京师范大学地理科学学院, 南京 210000;

2 南京师范大学环境科学研究所, 南京 210097;

3 南京赛特环境工程有限公司, 南京 210003)

**摘要:** 针对目前生命周期评价清单分析中数据有效性差, 以及线路板生产重金属废水和危险废物污染大的问题, 在生命周期清单分析中引入行业分配系数, 即根据行业和产品不同分别确定物耗、能耗和污染物排放分配系数; 并根据质能守恒原理设计了新数据分配算法, 将各类分配系数代入该算法, 将多种产品的混合数据分配到各单类产品中; 最后运用该方法对线路板进行生命周期清单分析, 得到了线路板行业的分配系数及单面板、双面板和多层板的生命周期清单。结果表明: 新分配算法优于目前常用的以相对质量进行数据分配的方法; 在线路板生命周期全过程中, 产品生产和报废处置两阶段对环境影响最大; 生产阶段最大的污染是危险固废, 而非传统认识中的重金属废水; 电力消耗是线路板生命过程中的主要能耗。

**关键词:** 环境学; 生命周期评价; 数据分配; 多产品系统; 行业分配系数; 线路板

中图分类号: X820.3 文献标识码: A

DOI: 10.13637/j.issn.1009-6094.2015.02.046

### 0 引言

生命周期评价(Life Cycle Assessment, LCA)是一种评价产品、工艺过程或活动从原材料的采集、加工到生产、运输、销售、使用、回收、养护、循环利用和最终处理整个生命周期系统有关的环境负荷的过程<sup>[1]</sup>。目前LCA作为主要环境管理工具之一, 已被纳入ISO 14000环境管理标准体系中, 成为当前国际产业界和学术界关注的焦点和研究热点<sup>[2]</sup>。但是, 因其自身的局限性, 存在广泛的不确定性, 严重影响评价结果的有效性, 其中生命周期清单(Life Cycle Inventory, LCI)中的不确定性最为突出<sup>[3]</sup>。

LCI是LCA研究的基础, 针对产品系统所有单元过程的输入和输出(原材料、能源、环境排放)进行清查和计算<sup>[2]</sup>。在多产品系统中, 由于数据未能合理分配而产生的误差是造成LCI不确定性的主要原因之一。目前, 国外对提高数据有效性的方法论研究较深入<sup>[4-9]</sup>, 而国内此类研究相对较少<sup>[2, 10-44]</sup>, 大多倾向于LCA的应用研究<sup>[15-47]</sup>。多产品系统是指多种产品同时产生于某个生产工艺或许多生产工艺基础设施共享、废物处理系统共用的生产体系<sup>[18]</sup>。如同时生产单面板、双面线路板和多层线路板的厂家就是多产品系统。在多产品系统中, LCI的重点和难点是根据既定的程序将物流、能流和环境排放等混合数据合理有效地分配到各个产品中。目前国内最常用的分配方法是以每种产品的相对质量来

进行数据分配<sup>[14]</sup>。此法操作较为简单, 但难以反映出不同产品在原料消耗、生产工艺和产污情况上的差别, 不适用于生产工艺基础设施共享、废物处理系统共用的多产品生产体系。针对这种情况, 本文提出行业分配系数, 即根据行业和产品工艺的不同来分别确定其物耗系数、能耗系数和污染物排放系数, 设计相应的新数据分配算法, 使之更适用于多产品系统混合数据的分配, 从而提高LCI结果的有效性和LCA结果的可信度。

### 1 行业分配系数的确定

#### 1.1 排污分配系数的确定

排污分配系数是根据《第一次全国污染源普查工业污染源产排污系数手册》、《第一次全国污染源普查城镇生活源产排污系数手册》和《第一次全国污染源普查集中式污染治理设施产排污系数手册》(以下简称手册)中的产排污系数进行求比例计算。该系数反映了各行业在我国产排污量的平均水平, 手册涉及的行业非常广泛, 主要污染物指标也较为翔实, 作为排污分配系数的参考值非常合适。

确定行业排污分配系数时, 首先根据手册目录找到待求行业所在的分册, 在分册中找到该行业的位置。由于手册中给出的行业主要污染指标较少, 在确定分配系数时, 需先将实际的污染指标与手册中相似的污染物归为一类, 然后选定一种产品的产污系数作为基准值 $X$ , 依次将其他产品的同一指标 $Y, Z$ 除以 $X$ , 得到一组行业排污分配系数, 即 $1: Y/X: Z/X$ 。

选择使用手册中产污系数而非排污系数是因为手册所给定的末端治理技术比较单一, 不能代表行业的不同治理工艺, 而且随着科技的不断发展和环保管理要求越来越严格, 治理技术将不断更新换代, 排污系数变动较大。而多产品系统中, 同一行业多种产品基础设施共享、废物处理系统共用, 消减率相同, 排污量相除求比例时, 消减率消去, 正好为产污系数之比, 因此, 优先考虑选择产污系数作为分配系数的参考值。此外, 此类分配系数应随普查手册的更新进行相应更新。对于未纳入普查范围内的行业, 只能按照目前算法来分配系统的输入与输出。

#### 1.2 物耗分配系数的确定

对于LCA的清单分析, 除需要分析产品生产过程中排放的污染物外, 还需要计算获取原材料所需要的物耗、能耗及排污情况, 这也是LCA不同于其他环境评价的特点。其中物耗分配系数的确定是根据产品的构造, 将其拆分成各种部件分别进行用量统计, 然后将不同产品同一部件的各用量相除, 得到的比例值就是该种部件的物耗分配系数。

#### 1.3 能耗分配系数的确定

能耗分析是LCA清单分析的一个重要环节。生产阶段能耗分配系数的确定是根据行业清洁生产标准中资源能源利用指标的二级指标——国内清洁生产先进水平, 进行求比例计算。运输阶段的能耗因为只与产品的重量有关, 所以分配系数根据产品的构造进行确定。其算法与排污分配系数相同, 选定一种产品单位面积的耗电量或耗水量为基准值 $X$ , 然后依次将其他产品的同一指标 $Y, Z$ 除以 $X$ , 得到一组行业能耗分配系数, 即 $1: Y/X: Z/X$ 。

选择资源能源利用的二级指标作为计算值的原因有两点: 一是我国目前的生产水平还达不到一级指标的国际清洁

\* 收稿日期: 2013-11-23

作者简介: 胡新燕, 硕士研究生, 从事环境规划与管理与生命周期评价方法学研究; 陈雁(通信作者), 副教授, 从事环境规划与管理与环境影响评价研究, jschenyan@126.com。

生产先进水平; 二是二级指标反映了国内先进水平, 是新改扩建企业必须达到的清洁生产水平, 是政策性要求。因此, 选择该指标是比较合适的。

### 2 数据分配计算公式

确定行业分配系数的最终目的是为了将多产品系统中的物流、能流和环境排放合理地分配到各个产品中, 数据分配的计算公式有两个: 一是求产品生产阶段的排污量和能耗, 另一个是求原料生产阶段的物耗、能耗和排污量。LCA 清单分析要求最后所有结果都为同一功能单位<sup>[19]</sup>, 因此数据分配时, 最后求得的结果均为单位排污量、单位能耗和单位物耗。

#### 2.1 产品生产阶段的排污量和能耗计算公式

在多产品系统中, 每种产品可能都会产生同一种污染物, 对该污染物数据进行分配时, 引入变量  $X$ 。假设每种产品此污染物的单位排放量为  $X_i$ , 每种产品的产量乘以对应的  $X_i$ , 得到各产品此污染物的实际排放量, 然后求和, 即为整个系统该种污染物的总排污量, 也就是企业可以监测到的排污值。每种产品  $X_i$  之比为该种污染物的排污分配系数, 能耗求算相同。因此得到以下方程式。

$$\begin{cases} \sum_{i=1}^n S_i X_i = W \\ X_1 : X_2 : \dots : X_n = 1 : k_2 : \dots : k_n \end{cases} \quad (1)$$

式中  $i$  为产品种类,  $i \in \{1, \dots, n\}$ ;  $S_i$  为某种产品产量;  $X_i$  为某种产品某一污染物(能源)的单位排放量(单位消耗量);  $W$  为所有产品某一污染物(能源)的总排放量(总消耗量);  $k_i$  为某一污染物(能源)的分配系数, 且  $k_1 = 1$ 。

由式(1)可以求出多产品系统中, 某种产品某一污染物(能源)的单位排放量(单位消耗量)为

$$X_i = \frac{k_i W}{\sum_{i=1}^n k_i S_i} \quad (2)$$

#### 2.2 原材料生产阶段的物耗、能耗和排污量计算公式

在多产品系统中, 生产每种产品可能都要使用同一种原材料, 而生产这种原材料又需要消耗一定的物质、能量, 产生一定的污染物。对以上数据进行分配时, 引入变量  $Y$ , 假设生产每功能单位某种产品消耗的原材料所需要的某种物耗为  $Y_i$ , 分别将每种产品的产量乘以对应的  $Y_i$ , 然后求和, 得到生产所有产品消耗的原材料所需要的这种物耗量, 也就等于单位原材料的物耗乘以原材料的总消耗。每种产品的  $Y_i$  之比

为该种物耗的分配系数。能耗、排污量求算相同。因此得到以下方程式。

$$\begin{cases} \sum_{i=1}^n S_i Y_i = S_y T \\ Y_1 : Y_2 : \dots : Y_n = 1 : k'_2 : \dots : k'_n \end{cases} \quad (3)$$

式中  $Y_i$  为生产每功能单位某种产品消耗的原材料所需要的物耗(能耗、排污量);  $S_y$  为原材料的总消耗量;  $T$  为生产单位原材料所需要的物耗(能耗、排污量);  $k'_i$  为某一物耗(能耗、排污量)的分配系数, 且  $k'_1 = 1$ 。

从式(3)可以得出, 生产每功能单位某种产品消耗的原材料所需要的物耗(能耗、排污量)为

$$Y_i = \frac{k'_i S_y T}{\sum_{i=1}^n k'_i S_i} \quad (4)$$

### 3 实例研究

采用上述方法, 对线路板行业的单面板、双面板、多层板 3 种产品进行生命周期清单分析, 并对混合数据进行分配。由于我国的生命周期评价的数据库尚不完善<sup>[20]</sup>, 为了提高生命周期清单数据的代表性和有效性, 选取我国线路板生产前沿地区苏州市的 24 家大型线路板厂进行实际生产数据调查, 分别进行清单分析和数据分配, 然后按照产品种类分类求平均值, 得到线路板行业单面板、双面板和多层板的生命周期清单表。除运输阶段外, 本文生命周期分析各步骤的数据均来自企业实际生产数据, 所产生的污染物均为经环保设施处理后排放到环境中的数值。

线路板(PCBs)是电子设备的一种极其重要的基础组装部件, 它广泛用于家用电器、仪器仪表、计算机等各种电子设备中。线路板按基材的性质可分为刚性印制板和挠性印制板两大类; 按布线层次可分为单面板、双面板和多层板 3 类。本文按照布线层次分类。

本文选取的功能单位是  $1 \text{ m}^2$  的线路板产品。研究边界包括原材料(覆铜板)的获取、线路板产品的生产、产品的运输, 以及报废处置, 见图 1。考虑到: 1) 生产覆铜板的铜矿开采来源极广, 不便于统计; 2) 线路板使用阶段的能量和物质投入约等于 0。这两部分不计算在生命周期范围内。此外, 本文仅考虑系统边界内与功能单位直接相关的过程或活动所带来的环境影响, 忽略诸如工厂基础设施建设、工人生活等活动造成的环境影响<sup>[16]</sup>。

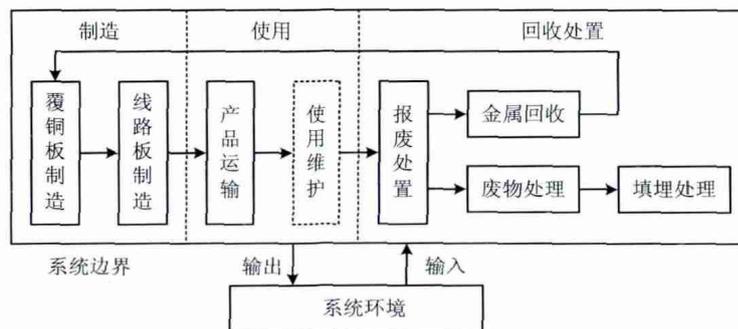


图 1 线路板生命周期系统边界  
Fig. 1 System boundary of life cycle inventory of PCBs

3.1 线路板行业分配系数的确定

3.1.1 排污分配系数的确定

根据上述排污分配系数的确定方法,在手册中找到印制电路板制造业,选定单面板为基准值,将SS、TP、氨氮这些常规污染物归为手册中COD一类,镍等重金属归为手册中铜一类,根据该企业的生产规模和产品类型,选择手册中相应的产污系数,然后分别用双面板、多层板的产污系数除以单面板的产污系数,得出线路板行业单面板、双面板、多层板的排污分配系数,见表1。

3.1.2 物耗分配系数的确定

线路板的原材料覆铜板,可以拆分成铜箔、环氧树脂、DMF(二甲基甲酰胺)、玻璃布、硬化剂(双氰胺)<sup>[21]</sup>,按物耗分配系数的确定方法,根据不同产品结构(图2),对不同种类线路板统计这些部件的不同用量,然后将同种部件的不同用量相除,得到的比例值就是线路板该种部件的物耗分配系数,见表2。

3.1.3 能耗分配系数的确定

按能耗分配系数确定的方法,在HJ 450—2008《清洁生产标准——印制电路板制造业》中找到资源能源利用指标这一栏,选择二级技术指标,分别用双面板、多层板的数值除以单

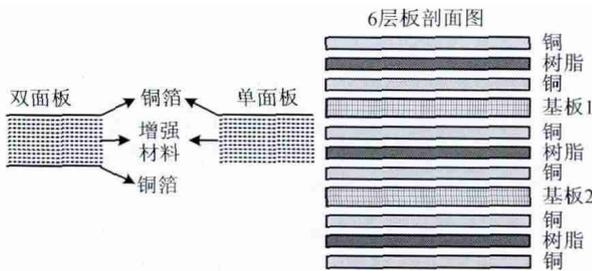


图2 线路板结构图

Fig.2 Printed circuit boards structure

表2 覆铜板分配系数

Table 2 Allocation coefficient of CCL( Copper Clad Laminate)

| 产品类型    | 指标       |                  |        |          |     |     |
|---------|----------|------------------|--------|----------|-----|-----|
|         | 铜箔       | 环氧树脂、DMF、玻璃布、双氰胺 | 水、电、柴油 | 废水       | 废气  | 固废  |
| 单面板     | 1        | 1                | 1      | 1        | 1   | 1   |
| 双面板     | 2        | 1                | 2      | 2        | 1   | 1.2 |
| 多层板(N层) | N        | N-1              | N      | N        | N-1 | N   |
| 说明      | 根据产品结构获得 |                  |        | 根据普查手册获得 |     |     |

表1 线路板排污量分配系数

Table 1 Pollution emission allocation coefficient of printed circuit boards

| 产品类型 | 指标                    |         |        |     |                |                          |                                |
|------|-----------------------|---------|--------|-----|----------------|--------------------------|--------------------------------|
|      | 废水中常规类 (COD/SS/TP/氨氮) | 废水中重金属类 | 废水中氰化物 | 废气* | 危险废物 (含铜污泥、锡渣) | 危险废物* (废电路板边角料、废底片、废活性炭) | 危险废物 (蚀刻废液、拨锡废液、电镀废液、显影废液、废油墨) |
| 单面板  | 1                     | 1       | 0      | 1   | 1              | 1                        | 1                              |
| 双面板  | 2                     | 1.5     | 1      | 2   | 6              | 1.2                      | 1.5                            |
| 多层板  | 6                     | 3       | 1      | 4   | 31             | 2.3                      | 10                             |

注:\* 表示选择的是手册中挠性板的数据。

面板的数值,得出线路板行业单面板、双面板、多层板的能耗分配系数,见表3。

3.2 生命周期清单分析和数据分配

3.2.1 原材料制取阶段

线路板生产的原材料是覆铜板,覆铜板是由玻璃布作增强材料,浸以树脂,单面或双面覆以铜箔,经热压而成的产品。制取过程中主要是能源资源的消耗和环境的污染,能源消耗主要是水、电、柴油,排放的污染物主要是有机废气和边角料等固体废物。

结合覆铜板分配系数及生产每平方米覆铜板物耗、能耗和排污量,根据式(3)和(4)对线路板的原材料获取阶段的数据进行分配,其中每平方米覆铜板的数据来自多家企业的平均值。生产每平方米单面板、双面板、多层板消耗的覆铜板所需物耗、能耗和排污量分配结果见表4。

3.2.2 产品生产阶段

线路板制造工艺复杂,生产过程中产生大量的废水废液,废水中污染成分复杂,铜、锡、银等重金属污染物也包含其中,此外,酸性废气、有机废气的排放也相当可观。在这个阶段,主要是水、电能源的消耗和废水、废气、固废的产生。单面板、双面板、多层板的生产工艺流程见图3~5。

结合线路板排污分配系数和能耗分配系数,根据式(1)和(2)对线路板生产阶段的排污量、能耗进行分配,生产每平方米单面板、双面板、多层板所需能耗和排污量分配结果见表5。

3.2.3 产品运输阶段

本文假设汽车运输,以柴油为燃料,运输里程按100 km计算。运输阶段主要是运输工具的尾气排放和燃料燃烧。根据文献[22]中机动车辆大气污染物排放参数及每平方米线路板的重量,计算产品运输阶段的能耗和排污量,结果见表6。

3.2.4 报废处置阶段

废弃印刷线路板的主要组成部分是有机聚合物,还含有大量的铜、铁、铝、镍等金属。目前尚无可靠、可以大规模推广

表3 线路板能耗分配系数

Table 3 Energy consumption allocation coefficient of printed circuit boards

| 产品类型    | 指标         |         |
|---------|------------|---------|
|         | 水量         | 电量      |
| 单面板     | 1          | 1       |
| 双面板     | 3.5        | 2.2     |
| 多层板(N层) | 3.5 + 1.5N | 2.6 + N |

应用的废弃印刷电路板处置技术。焚烧技术尽管已有较长的应用历史,但溴代二噁英等污染物生成问题仍没有彻底解决<sup>[23]</sup>。经查阅资料和企业实际调查,国内目前多采取静电分选的方法回收废弃线路板中的铜,并分离出树脂粉末填埋处理,整个过程属于物理分离过程。报废处置阶段主要是拆解过程中的能源消耗、废气排放、填埋空间占用、原材料回收等。结合粉碎每平方米线路板物耗、能耗及每平方米线路板的重量,计算产品运输阶段的能耗和排污量,结果见表 7。其中每平方米线路板物耗、能耗的数据来自多家企业的平均值。

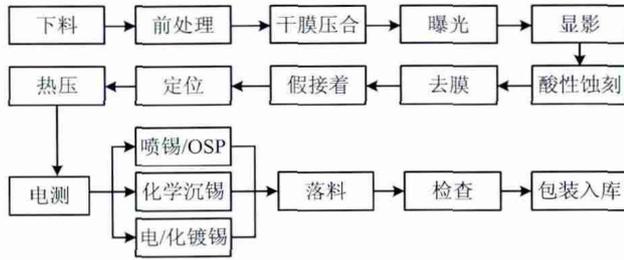


图 3 单面板生产工艺流程图

Fig. 3 Flow chart of production of single-sided PCB

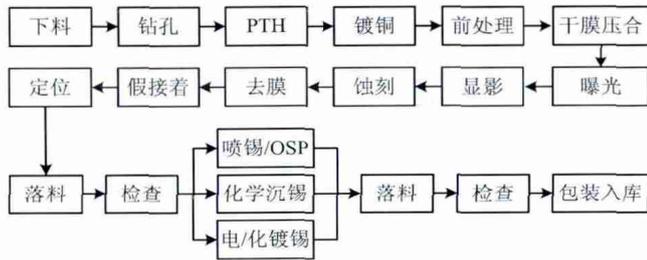


图 4 双面板生产工艺流程图

Fig. 4 Flow chart of production of dual-sided PCB

表 4 原材料制取阶段生命周期清单

Table 4 Life cycle inventory of materials production stage

| 环境要素  | 指标   | 单面板      | 双面板      | 多层板      |
|---|--|----------|----------|----------|
| 资源消耗/<br>(kg · a <sup>-1</sup> · 功能单位 <sup>-1</sup> ) | 水/(m <sup>3</sup> · a <sup>-1</sup> · 功能单位 <sup>-1</sup> ) | 0.000 15 | 0.000 33 | 0.001 24 |
|   | 电/(kW · h · a <sup>-1</sup> · 功能单位 <sup>-1</sup> )         | 0.802    | 1.774    | 6.631    |
|   | 柴油   | 0.335    | 0.741    | 3.702    |
|   | 铜箔   | 0.192    | 0.426    | 2.128    |
|   | 环氧树脂   | 1.435    | 1.543    | 9.883    |
| 水污染/<br>(g · a <sup>-1</sup> · 功能单位 <sup>-1</sup> )   | 玻璃纤维布  | 0.527    | 0.567    | 3.631    |
|   | DMF(溶剂)  | 0.206    | 0.222    | 1.422    |
|   | DICY(固化剂)  | 0.029    | 0.031    | 0.201    |
|   | COD  | 0.172    | 0.446    | 1.498    |
| 大气污染/<br>(g · a <sup>-1</sup> · 功能单位 <sup>-1</sup> )  | SO <sub>2</sub>  | 0.146    | 0.157    | 1.009    |
|   | NO <sub>x</sub>  | 2.237    | 2.406    | 15.411   |
|   | DMF  | 0.146    | 0.157    | 1.009    |
|   | 丙酮   | 1.303    | 1.402    | 8.978    |
| 固废/<br>(g · a <sup>-1</sup> · 功能单位 <sup>-1</sup> )    | 覆铜板边角料   | 6.752    | 9.887    | 63.874   |
|   | 玻璃纤维布边角料   | 3.640    | 5.330    | 34.158   |
|   | 铜箔边角料  | 0.993    | 1.454    | 9.316    |

注: 因为固废是零排放,所以该类指标为污染物的产生量,水污染、大气污染指标均为排放量。

表 5 生产阶段生命周期清单

Table 5 Life cycle inventory of PCBs' production stage

| 环境要素   | 指标   | 单面板     | 双面板     | 多层板       |
|--|--|---------|---------|-----------|
| 资源消耗/<br>(g · a <sup>-1</sup> · 功能单位 <sup>-1</sup> ) | 水/(m <sup>3</sup> · a <sup>-1</sup> · 功能单位 <sup>-1</sup> ) | 0.163   | 0.606   | 2.231     |
|  | 电/(kW · h · a <sup>-1</sup> · 功能单位 <sup>-1</sup> )         | 14.832  | 33.436  | 148.322   |
|  | COD  | 33.895  | 59.699  | 171.779   |
|  | SS   | 10.071  | 18.813  | 68.016    |
|  | NH <sub>3</sub> -N   | 0.546   | 0.920   | 5.748     |
| 水污染/<br>(g · a <sup>-1</sup> · 功能单位 <sup>-1</sup> )  | TP   | 0.055   | 0.082   | 0.252     |
|  | 总铜   | 0.188   | 0.242   | 0.427     |
|  | 总镍   | 0.022   | 0.023   | 0.037     |
|  | 总氰化合物  | 0       | 0.001 4 | 0.001 4   |
|  | 粉尘   | 1.767   | 2.653   | 5.340     |
| 大气污染/<br>(g · a <sup>-1</sup> · 功能单位 <sup>-1</sup> ) | 硫酸雾  | 0.945   | 1.710   | 6.482     |
|  | 氯化氢  | 0.263   | 1.110   | 2.423     |
|  | 氨气   | 0.172   | 0.239   | 0.527     |
|  | NO <sub>x</sub>  | 0.329   | 1.112   | 2.702     |
|  | 含锡废气   | 0.081   | 0.116   | 0.308     |
|  | 甲醛   | 0.322   | 0.641   | 0.833     |
|  | 非甲烷总烃  | 0.711   | 1.105   | 2.893     |
|  | 废边角料、报废品   | 116.031 | 143.225 | 498.879   |
|  | 蚀刻废液   | 362.493 | 528.237 | 3666.179  |
|  | 剥锡废液   | 131.788 | 144.462 | 1 147.941 |
| 固废/<br>(g · a <sup>-1</sup> · 功能单位 <sup>-1</sup> )   | 底片显影、定影废液  | 4.040   | 7.562   | 46.519    |
|  | 废油墨  | 2.062   | 2.162   | 13.453    |
|  | 废活性炭   | 31.100  | 32.026  | 55.574    |
|  | 底片废物   | 3.304   | 3.382   | 16.630    |
|  | 镀铜废液   | 2.926   | 6.893   | 72.790    |
|  | 镀镍废液   | 3.109   | 9.064   | 85.764    |
|  | 含金废液   | 1.409   | 4.768   | 23.664    |
|  | 废金属污泥  | 67.551  | 706.195 | 3 427.114 |

注: 因为固废是零排放,所以固废指标为污染物的产生量,水污染、大气污染指标均为排放量。

表 6 运输阶段生命周期清单

Table 6 Life cycle inventory of transportation stage

| 环境要素                            | 指标   | 单面板   | 双面板   | 多层板    |
|---------------------------------|------|-------|-------|--------|
| 资源消耗/(mL · 功能单位 <sup>-1</sup> ) | 柴油   | 2.750 | 3.250 | 25.100 |
| 大气污染/(g · 功能单位 <sup>-1</sup> )  | 二氧化硫 | 0.009 | 0.011 | 0.081  |
|                                 | 一氧化碳 | 0.074 | 0.088 | 0.678  |
|                                 | 氮氧化物 | 0.122 | 0.144 | 1.114  |
|                                 | 烃类   | 0.012 | 0.014 | 0.111  |

表 7 报废处置阶段生命周期清单

Table 7 Life cycle inventory of scrap disposal stage

| 环境要素  | 指标  | 单面板      | 双面板      | 多层板       |
|---|-----|----------|----------|-----------|
| 资源消耗/(kW · h · a <sup>-1</sup> · 功能单位 <sup>-1</sup> ) | 电   | 0.115    | 0.136    | 1.052     |
| 大气污染/(g · a <sup>-1</sup> · 功能单位 <sup>-1</sup> )      | 粉尘  | 1.336 8  | 1.579 9  | 12.201 4  |
|   | 锡   | 0.004 6  | 0.005 4  | 0.042 0   |
|   | 铜   | 0.001 6  | 0.001 8  | 0.014 2   |
|   | 铅   | 0.000 5  | 0.000 6  | 0.004 9   |
| 固废/(g · a <sup>-1</sup> · 功能单位 <sup>-1</sup> )        | 镉   | 0.000 6  | 0.000 7  | 0.005 6   |
|   | 树脂粉 | 1 443.97 | 1 706.51 | 13 179.47 |

注: 因为固废是零排放,所以该类指标为污染物的产生量,大气污染指标均为排放量。

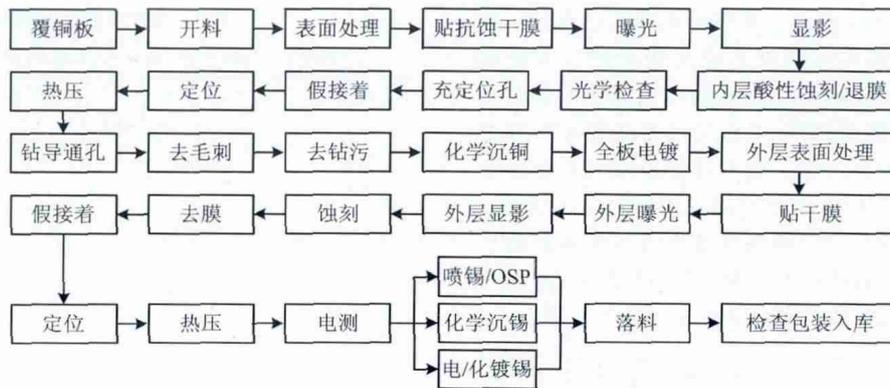


图5 多层板生产工艺流程图

Fig. 5 Flow chart of production of multi-layer PCB

#### 4 结论

1) 使用行业分配系数和新数据分配算法得到的生命周期清单,数据分配更为细致,不同指标的分配比例不同,解决了传统的质量分配法不能区分产品结构和工艺差别而产生的指标比均相同的问题,有效提高了生命周期评价数据的有效性,更适用于多产品系统的混合数据分配。

2) 清单结果表明,线路板对环境的影响主要集中在产品生产阶段和报废处置阶段。生产阶段的固废产生量特别是危险废物产生量大,在关注传统废水治理的同时也应注意固废的减量化、资源化和无害化。另外,非甲烷总烃的排放量占大气总排污量的50%以上,有机废气的治理也应得到重视。报废处置阶段主要是废树脂粉产生量大,填埋处置耗费土地资源,应考虑进一步回收其有效成分再利用。

3) 在线路板生命周期的4个阶段中,电力消耗占总能耗的比重最大,在清洁生产方面应考虑采用先进工艺和生产设备降低综合电耗。

#### References(参考文献):

- [1] FAN Qingxin(樊庆铨), AO Hongguang(敖红光), MENG Chao(孟超). Life cycle assessment [J]. *Environmental Science and Management(环境科学与管理)*, 2007, 32(6): 177-180.
- [2] YANG Jianxin(杨建新), WANG Shoubing(王寿兵), XU Cheng(徐成). Allocation rule in life-cycle inventory [J]. *China Environmental Science(中国环境科学)*, 1999, 19(3): 285-288.
- [3] REN Lijuan(任丽娟), CHEN Sha(陈莎), ZHANG Jingjing(张菁菁). Uncertainty analysis in the inventory of the life cycle assessment [J]. *Journal of Safety and Environment(安全与环境学报)*, 2010, 10(2): 118-121.
- [4] Society of Environmental Toxicology and Chemistry (SETA). *Guidelines for life-cycle assessment: a code of practice* [M]. Brussels: SETAC Europe, 1993.
- [5] WALTER K. Allocation rule for open-loop recycling in life cycle assessment [J]. *International Journal of Life Cycle Assessment*, 1996, 1(1): 27-31.
- [6] KARLSSON R. LCA as a guide for the improvement of recycling [C]. // *Proceedings of the European Workshop on Allocation in LCA*. Leiden: Institute of Environmental Sciences, 1994: 18-28.
- [7] MICHAEL H, WENZEL H. *Environmental assessment of products* [M]. London: Chapman & Hall, 1997: 541-565.
- [8] VIGON B W, TOLLE D A, COMABY B W, et al. *Life cycle assessment: inventory guide lines and principles* [M]. Cincinnati: EPA Press, 1993: 87-93.
- [9] RAYMOND R. Using fuzzy numbers to propagate uncertainty in matrix-based LCI [J]. *International Journal of Life Cycle Assessment*, 2012, 13(7): 585-592.
- [10] XIA Tian(夏添), DENG Chao(邓超), WU Jun(吴军). Algorithmic research of inventory analysis in life cycle assessment [J]. *Computer Engineering and Design(计算机工程与设计)*, 2005, 26(7): 1681-1683.
- [11] ZHENG Yuan(郑元), ZHANG Tianzhu(张天柱). Life cycle assessment under data uncertainty and its application [J]. *Chongqing Environmental Sciences(重庆环境科学)*, 2003, 25(6): 18-20.
- [12] LIU Tao(刘涛), HUANG Zhijia(黄志甲). Selection for key data in uncertainty analysis of life cycle inventory [J]. *Journal of Anhui University of Technology: Natural Science(安徽工业大学学报:自然科学版)*, 2006, 23(1): 91-95.
- [13] ZHU Lihong(朱立红), LIU Gangfu(刘光复). Analysis of the uncertainty of life cycle inventory [J]. *Journal of Hefei University of Technology: Natural Science(合肥工业大学学报:自然科学版)*, 2012, 35(7): 870-873.
- [14] XI Deli(席德立), PENG Xiaoyan(彭小燕). Data acquisition for inventory analysis in LCA [J]. *Environmental Science(环境科学)*, 1997, 18(6): 84-87.
- [15] XIAO Jun(肖君), ZHAO Ping(赵平), LIU Ruijie(刘睿劫). Influence of the exterior insulating building board on the environment health from the point of view of its life circle [J]. *Journal of Safety and Environment(安全与环境学报)*, 2013, 13(1): 138-141.
- [16] QIAN Hongwei(钱洪伟), YIN Xiangju(尹香菊). Assessment analysis of the life cycle of borax preparation process [J]. *Journal of Safety and Environment(安全与环境学报)*, 2013, 13(3): 127-131.
- [17] YANG Xiaoguang(杨孝光), CHEN Sha(陈莎), REN Lijuan(任丽娟). Review of environmental impact assessment of land use based on life cycle assessment [J]. *Journal of Safety and Environment(安全与环境学报)*, 2012, 12(5): 147-150.
- [18] DENG Nansheng(邓南圣), WANG Xiaobing(王小兵). *Life cycle assessment(生命周期评价)* [M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2003: 103.
- [19] CHEN Liang(陈亮), LIU Mei(刘玫), HUANG Jin(黄进). GB/T 24040—2008 *Environmental management—life cycle assessment—principles and framework* national standard understanding [J]. *Standard Science(标准科学)*, 2009(2): 76-80.
- [20] DIAO Zhouwei(刁周玮), SHI Lei(石磊). Life cycle assessment of photovoltaic panels in China [J]. *Research of Environmental Sciences(环境科学研究)*, 2011, 24(5): 571-579.
- [21] ZHU Datong(祝大同). Innovation of technology about dipping and process of prepreg—review of Panasonic's patent about dipping and process of prepreg in recent years [J]. *Copper Clad Laminate Information(覆铜板资讯)*, 2012(2): 20-24.

- [22] HU Mingcao(胡名操). *Practical data handbook of environmental protection*(环境保护实用数据手册)[M]. Beijing: China Machine Press, 1994: 103.
- [23] WANG Bo(王波), HONG Li(洪丽). Research review on the ways of disposal of waste printed circuit boards[J]. *Journal of Safety and Environment*(安全与环境学报), 2013, 13(1): 80-84.

## Life cycle inventory of printed circuit board based on a new data allocation algorithm

HU Xin-yan<sup>1</sup>, CHEN Yan<sup>2</sup>, YAN Xi-chun<sup>3</sup>, DAI Ke-wei<sup>2</sup>

(1 College of Geographical Science, Nanjing Normal University, Nanjing 210000, China; 2 Institute of Environmental Sciences, Nanjing Normal University, Nanjing 210097, China; 3 Nanjing Saite Environmental Engineering Co., Ltd., Nanjing 210003, China)

**Abstract:** This paper is aimed to introduce its design project of a renovated data-allocation algorithm of LCI and its application to the three kinds of printed circuit boards with the intention to overcome the poor validity of the current LCI data. What is more, the pollution caused by the heavy metal sewage and hazardous wastes remains serious with the production of the printed circuit boards. To solve the above said problems, we would like to introduce into the renovated design project the industry allocation coefficient, which includes the coefficients of the raw material consumption, the energy consumption and the production pollution respectively on the basis of our study of different related industrial products. The so-called coefficient of the raw material consumption based on the product structure has been defined and confirmed in accordance with the clean industrial production standards in line with the standards set in the *Manual of the First National Census Sources of Pollution*. What is more, we have improved a new algorithm in calculating the mixed data of multi-used products for single products in line with the energy conservation. And, finally, we have managed to introduce the said algorithm into the LCI of the printed circuit boards and that of the single-sided, the dual-sided and the multi-layer printed circuit boards. The data lists in the paper demonstrate that, first of all, the industry allocation coefficient and the innovated allocation algorithm we have proposed are more advantageous than the commonly used methods in data distribution in accordance with the quality standards concerned. And, in turn, the industrial distribution coefficient and the algorithm we have improved are particularly suitable for the multi-purposed product system of LCI production due to its superiority in adaptability to the variations of the structure of the products. Secondly, in the whole process of production of the printed circuit boards, the production and the scrap disposal helps to protect the environment quality and safety to a full extent. And, thirdly, the biggest pollution in the production stage turns to be the hazardous solid waste rather than the heavy metal sewage as used to be in the traditional way. And, the last but not the least, as a matter of fact, the electric power consumption has become the main energy consumption form in the whole period of the Circuit Boards working life cycle.

**Key words:** environmentalology; life cycle assessment; data allocation; multi-product system; industry allocation coefficient; printed circuit boards

**CLC number:** X820.3      **Document code:** A

**Article ID:** 1009-6094(2015)02-0222-06

文章编号: 1009-6094(2015)02-0222-05

## 基于可转换萃取剂的废弃油基钻井液处理方法\*

刘娉婷, 黄志宇

(西南石油大学化学化工学院, 成都 610500)

**摘要:** 废弃油基钻井液对环境危害较大, 处理困难。现有的处理技术具有成本高、能耗大或萃取剂难以分离等问题。提出了“利用亲水性能可以转换的萃取剂处理废弃油基钻井液”的新方法, 利用自然状态下疏水的萃取剂萃取废弃油基钻井液中的油分, 再利用其亲水性能的转换实现油和萃取剂的分离及萃取剂的回收。该方法操作简单, 无高温高压设备, 萃取剂易于回收并可重复使用, 克服了传统处理方法的缺陷。试验结果表明, 应用可转换萃取剂处理废弃油基钻井液效果较好, 油回收率超过93%, 除油后剩余废水含油量小于16.5 mg/L, 剩余固体残渣含油率低于3%。

**关键词:** 环境工程学; 废弃油基钻井液; 可转换萃取剂; 处理技术

**中图分类号:** X741      **文献标识码:** A

**DOI:** 10.13637/j.issn.1009-6094.2015.02.047

### 0 引言

钻井液被公认为石油钻井的血液, 在油气田开发过程中拥有举足轻重的地位<sup>[1-2]</sup>, 而废弃钻井液为油田开采的三大公害之一<sup>[3-4]</sup>, 其中废弃油基钻井液因其含油率高成为废弃钻井液处理中的重点与难点<sup>[5-6]</sup>。废弃油基钻井液的处理区别于常规钻井液的处理主要在于其中油类资源的处理, 目前工程上常用的回注、填埋等方法既浪费了资源, 也未从根本上杜绝油类物质对环境的污染<sup>[7]</sup>。国际上能够实现油类回收的处理方法主要有热解吸技术<sup>[8-10]</sup>、溶剂萃取法<sup>[11]</sup>、化学破乳分离法<sup>[12]</sup>和超临界萃取法<sup>[13-14]</sup>。但这些方法普遍存在处理成本高或资源浪费的问题, 因为添加进去的溶剂或试剂无法回收再利用; 超临界流体虽然可以通过改变条件回收萃取剂, 但设备的造价和能耗太高。如果自然状态下就能够实现溶剂状态的可逆转换, 就有望解决这一问题。

本文提出基于可转换萃取剂的废弃油基钻井液处理方法。这种处理剂可以像传统的萃取剂一样将废弃油基钻井液中的油分萃取出来, 再通过简单的方法实现萃取剂亲水性能的转变, 即将萃取剂转变为亲水性溶剂, 而萃取出的油分并不发生转变, 因而不需要挥发溶剂就可以将油分分离出来, 随后再将进入水相的萃取剂转变回疏水性即可回收并多次使用。

### 1 可转换萃取剂的作用机理

可转换萃取剂是一种叔胺类有机试剂, 它在常温常压下表现出疏水性的特征, 与水混合后可观察到明显的分层现象(见图1(a)), 通入甲气体(CO<sub>2</sub>)后其疏水性逐渐转变为亲水性, 与水混溶为均一溶液(见图1(b)), 再通入乙气体(N<sub>2</sub>、Ar或空气)后转变回疏水性, 与水之间的分层界面又逐步显现

\* 收稿日期: 2014-12-24

作者简介: 刘娉婷, 博士研究生, 从事环境污染化学防治研究; 黄志宇(通信作者), 教授, 从事油气田化学工程和油气田环境保护研究, hzy3019@163.com。