

综合考虑资源利用与环境影响的烟分析法应用*

王彦峰 冯 霄**

(西安交通大学环境与化学工程学院, 西安 710049)

摘要 为了综合评价过程系统的资源利用和环境影响, 在传统烟分析的基础上, 将其应用范围拓宽到能够考虑排放物对环境的污染, 从而得到可以用来综合评价过程系统的资源利用性和环境影响性的技术性指标. 引入危害系数和效应系数分别考虑不同污染物的危害程度以及环境污染相对资源浪费的效应. 讨论了危害系数和效应系数的确定方法. 应用本方法对两个聚氯乙烯悬浮聚合工艺流程进行了计算, 通过对计算结果的比较和分析, 表明本方法可以较全面的评价化工过程的资源利用性和环境影响性.

关键词 烟分析方法 资源利用 环境影响 聚氯乙烯

由于人类对自然的盲目破坏, 人类面对着的生态危机、水源危机、食物危机以及能源危机正威胁着人类赖以生存与持续发展的基本条件^[1], 日益严重的环境问题使得人们不得不重新审视自己的社会经济行为, 认识到单纯追求经济效益的传统发展模式和以末端治理为主的污染控制策略已经不能适应当今社会发展的需要, 而必须走清洁生产的道路, 即任何生产过程从一开始设计到生产运行都要考虑资源的有效利用和生态环境的保护. 各国学者在这方面做了大量的研究工作. Douglas 扩展了他的分层决策理论^[2], 在工艺流程生成中引入了过程系统排放废物量最少这一目标. 基于 Douglas 的理论, Flower 等提出了一种叫做图解物料衡算法^[3], 用来筛选不违背环保规定的初始工艺流程. El-Halwagi 等用质量夹点的概念导出了费用最优的质量传递网络^[4], 它的废物排放量最小. 基于同一种思想, Wang 和 Smith 研究出一种可以在过程系统中获得最小废水量的设计目标方法^[5]. Pistikopoulos 等提出了环境影响最小化思想 (MEIM)^[6], 通过计算过程系统对环境的负效应来评价过程系统对环境的污染程度. Stefanis 等提出一种环境影响最小化方法, 把产品生命周期分析理论 (LCA) 引入过程优化设计中^[7]. 墨西哥石油研究院的 Rivero 提出基于烟生态分析的系统改进潜力 Pot_{ee} ^[8], 这个值越大说明系统对环境污染越严重. Stefanis 等提出一种将补偿性设计思想和反应路径综合方法引入环境影响最小化思想中的方法^[9], 利用这种方法可以找到一条投资费用和环境影响都最小的最优路径. Rosen 利用烟分析方法对系统进行分析改进, 以提高系统的原材料和能源的利用率, 从而减少系统的废物排放量^[10].

综上所述, 各国学者的研究工作主要集中在两个方面: 一是仅仅考虑系统排放废物对环境的影响及如何减少废物排放, 从而减轻对环境的污染, 而未综合考虑系统的资源利用性和

2000-07-06 收稿, 2000-11-03 收修改稿

* 国家自然科学基金(批准号: 29836140)及国家重点基础研究(批准号: G20000263)发展规划基金资助项目

** 联系人, E-mail: xfeng@xjtu.edu.cn

经济性;另一是将系统的资源利用性和环境影响性作为一个多目标优化问题来处理,这样可以克服第一种情况的片面性,但由于系统的复杂性和非线性,使系统优化问题的超结构模型建立和求解都很困难.基于这种现状,我们考虑用一个评价指标将系统的资源利用性和环境影响性综合在一起考虑,用此指标分析和优化过程系统,从而将多目标优化问题转化为单目标优化问题,易于系统的优化模型的建立和求解.

Rant 于 1956 年首先提出了焓这个热力学参数的概念,经过几十年的发展,焓分析方法已经成为分析能量系统的基本理论和有力工具,并得到了广泛的重视和应用.焓参数以环境状态为基准,衡量一个系统或一个物流与环境的差异,因而只要合适地选择环境状态,不仅可以衡量系统的能量或资源利用,也可以衡量排放物对环境的污染.但是传统的焓分析方法只能评价系统的能源利用性,若直接用其对系统的环境影响性进行评价,会出现一些问题.因此我们提出了环境负效应和系统负效应等新概念,在传统的焓分析方法的基础上,拓宽了它的应用范围,使其能够更全面地评价系统的资源利用性和环境影响性^[11],所得到的系统负效应这一系统评价指标可以作为系统进一步改进的优化目标.在本文中还应应用该方法计算分析了聚氯乙烯悬浮聚合工艺流程.

1 综合考虑资源利用与环境影响的焓分析方法

首先将传统的焓分析方法应用范围扩展到可以考虑系统的环境效应.

系统对环境的影响可以用系统的焓排放损失来衡量.系统对环境的焓排放损失包括两部分:一是系统的散热焓损失;另一是系统排放物本身所具有的物理焓和化学焓.散热焓损失是以热量的形式为环境所吸收,可以说对环境不产生什么危害.而系统的排放物中有多种成分,而且各种成分由于其化学性质(毒性、温室效应性、光化学效应性、同温层臭氧损耗性、酸雨性等)的不同,对环境造成的危害程度也各不相同.所以在计算系统排放物的焓损失时,不能只是将这些成分的焓损失简单叠加,应该考虑到上述因素.可以引入危害系数来反映它们对环境所造成的危害程度的不同.这样计算出的排放物的焓损失由于已经不满足焓平衡方程,所以不再是传统意义上的焓损失了.因此,我们定义一个新概念——系统的环境负效应(ENE)作为评价系统对环境的影响程度的指标.定义式如下:

$$ENE = \sum_i B_i E_{x,i}, \quad (1)$$

式中, ENE 为系统的环境负效应、 $E_{x,i}$ 为系统排放物中第 i 种成分所具有的物理焓和化学焓,单位为 kW; B_i 为系统排放物中第 i 种成分对环境的危害系数.

当考虑系统在资源利用与环境影响的综合效应时,在前面所定义的环境负效应的基础上,可以很方便地将焓分析方法应用范围扩展至可以综合评价系统的资源利用性和环境影响性.我们将此综合评价指标定义为系统负效应(SNE).

因为所有的焓损失均造成资源的浪费,所以系统对资源的负效应可以用系统的所有焓损失的总和($E_{xl\ tot}$)来表示,它等于系统焓耗散和焓排放损失之和.

此外, 如前所述, 系统的烟排放损失还造成了环境的污染, 因此, 在考虑系统的总效应时, 这部分烟损失需要计及两次: 对资源的浪费在 $E_{xl\ tot}$ 中计及, 对环境的负效应在 ENE 中计及。然而, 由于系统对资源的浪费和系统对环境的污染两者并不等价, 所以不能将它们简单叠加来求取系统负效应。同样地, 我们引入效应系数来考虑这种不等价。

定义系统负效应为

$$SNE = C_1 E_{xl\ tot} + C_2 ENE, \quad (2)$$

式中, SNE 为系统负效应、 $E_{xl\ tot}$ 为系统总的烟损失, 单位为 kW; C_1, C_2 为效应系数。

若取资源效应系数 C_1 为 1, 则(2)式变为

$$SNE = E_{xl\ tot} + C'_2 ENE, \quad (3)$$

式中 C'_2 为折合环境效应系数, 它是环境效应系数 C_2 与资源效应系数 C_1 之比。

系统的环境负效应中的危害系数 B_i 的确定比较复杂, 因为污染物多种多样, 而且它们作为化学物质所特有的化学性质(毒性、温室效应性、光化学效应性、同温层臭氧损耗性、酸雨性等)也各不相同。文献[12]给出化学物质的潜在危害系数, 充分考虑了化学物质的各种特性, 可以考虑以此作为本方法中的污染物的危害系数。

系统负效应中的效应系数 C_1, C_2 的确定比较困难, 因为资源的浪费与环境的污染不具有直接的可比性。为使两者具有可比性, 我们用其所造成的系统的经济损失来确定效应系数。

系统的环境负效应造成的经济损失计算起来较为复杂, 因为它涉及的范围很广, 文献[1]给出了计算这些经济损失的一些方法和实例, 很有参考价值。

系统的总的烟损失所造成的资源浪费而引起的经济损失为

$$E_{cli} = \sum E_{xli} P_{in,j}, \quad (4)$$

式中 E_{cli} 为资源经济损失, 单位为元; $E_{xli,j}$ 为系统中第 j 个部件的烟损失, 单位为 kW; $P_{in,j}$ 为系统中第 j 个部件的输入烟成本, 单位为元/kW。

至此, 各未知参数全部得到确定, 可以计算出系统负效应这一评价指标, 对系统的资源利用性和环境影响性进行评价。但是系统负效应是一个绝对量, 它可以用来评价同类系统或者一个系统的不同方案, 但不能评价不同类型的系统。所以我们又定义一个相对量——系统负效应因子($SNEF$)作为评价不同类型系统优劣的技术性指标, 其定义式如下:

$$SNEF = \frac{SNE}{E_{x\ in}}, \quad (5)$$

式中 $SNEF$ 为系统负效应因子; $E_{x\ in}$ 为系统的输入烟, 单位为 kW。

2 聚氯乙烯悬浮聚合工艺流程的计算及分析

下面应用综合考虑资源利用与环境影响的烟分析法对 A, B 两个聚氯乙烯悬浮聚合工艺流程进行计算分析。

聚氯乙烯悬浮聚合工艺流程 A^[13]的流程图如图 1 所示。从氯乙烯装置来的新鲜 VCM(氯乙烯)间歇注入 VCM 贮槽中, 与回收的 VCM 以及添加剂和纯水, 以一定的比例混合后, 间歇性地加入聚合釜中。聚合反应完成后, 聚氯乙烯浆液经脱离氯乙烯单体操作后, 被送至浆液罐, 由浆液罐将贮存的聚氯乙烯浆液连续地向离心分离机输送, 经离心脱去水、添加剂后, 聚氯乙烯

烯滤饼进入流化干燥器中, 进一步除去其中的空气、水、VCM, 成为产品输送去包装工序. 同时未反应的氯乙烯单体在聚合釜中直接汽提加以回收, 并贮存在气柜中, 再经过氯乙烯单体精制工序进行精馏, 最后送至氯乙烯单体回收槽中. 特别说明此流程与一般的聚氯乙烯流程的不同之处在于: 在聚合釜和浆液罐之间省去了一汽提塔. 未反应的氯乙烯单体的汽提不是在专门的汽提塔中进行的, 而是在聚合反应结束后, 直接在聚合釜中进行的. 采用这种方式, 简化了流程, 缩短了每批料所需时间, 而且用一个容器完成了原来两个容器的工作, 从而减少了一个氯乙烯单体排出源. 但同时也带来一定的问题, 即氯乙烯回收不够充分.

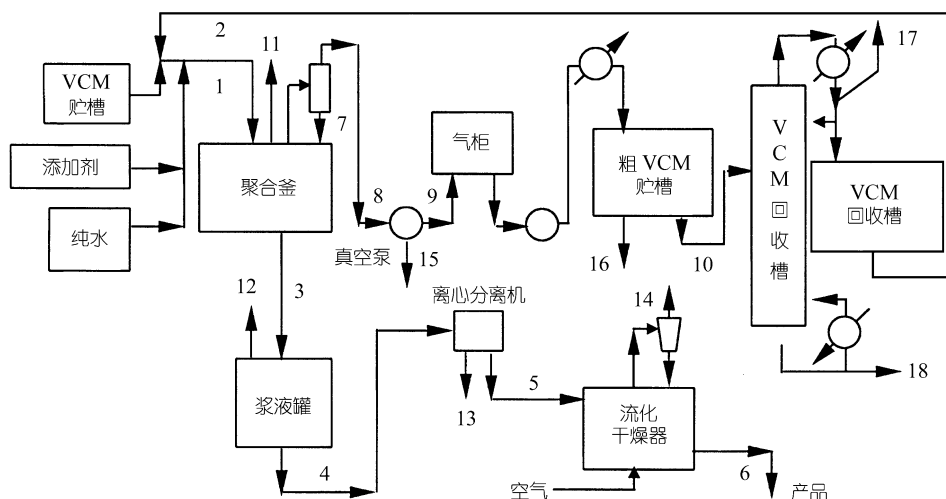


图 1 聚氯乙烯悬浮聚合工艺流程 A 的流程图

聚氯乙烯悬浮聚合工艺流程 B 的流程图如图 2 所示. 此流程是传统的聚氯乙烯生产流程. 聚合反应前的流程与流程 A 相同. 聚合反应完成后, 聚氯乙烯浆液先注入回收槽中, 由回收槽将浆液连续性地向汽提塔中输送. 汽提后的聚氯乙烯浆液经混料槽送至分离干燥工序, 脱去其中的水、空气、添加剂和 VCM, 成为产品送去包装工序. 同时, 在回收槽中回收了大部分未反应的氯乙烯单体, 另一部分由汽提塔进一步回收. 两部分混合后进入一级、二级冷凝器精馏. 精制后的氯乙烯单体又作为以后反应的原料, 贮存在 VCM 槽中, 由 VCM 泵间歇性地向聚合釜输送. 此流程和 A 流程比较起来较为复杂, 原因是采用了回收槽和汽提塔等专门设备对未反应的氯乙烯单体进行汽提. 这样做的目的是为了能够更加充分回收未反应的氯乙烯单体, 但同时也造成了氯乙烯排出源增加, 投资费用和运行费用增加等问题.

首先计算两个过程系统的输入焓、输出焓、及系统的总的焓损失(包括系统的内部焓损失和外部焓损失). 计算结果见表 1 和 2. 其次, 计算系统各排放物的物理焓和化学焓之和, 计算结果列于表 3 和 4. 系统各排放物的危害系数值见表 5^[12]. 则系统 A 的环境负效应 $ENE = 0.76 \times 10^6 \times 10.5 + 0.00006 \times 10^6 \times 4 = 5.17 \times 10^{10} \text{ kJ/a}$. 系统 B 的环境负效应 $ENE = 4.63 \times 10^9 \text{ kJ/a}$. 最后, 确定系统的资源效应系数和环境效应系数. 计算系统负效应.

系统对资源的浪费引起的经济损失, 可通过下式进行计算^[14]:

$$E_{\text{资源}} = \text{系统的输入焓成本} \times \text{系统总的焓损失}. \quad (6)$$

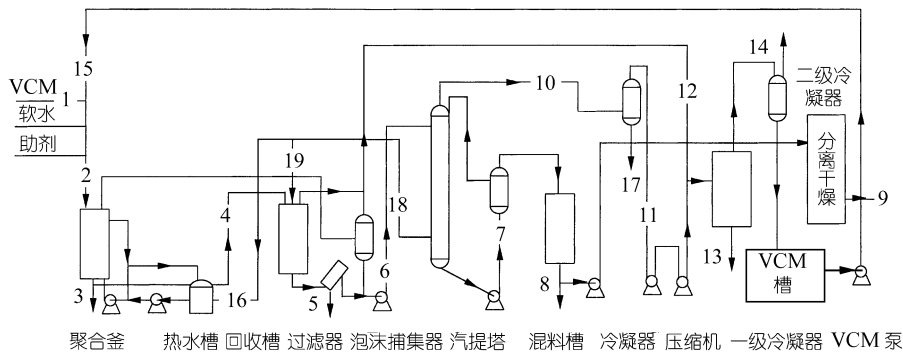


图 2 聚氯乙烯悬浮聚合工艺流程 B 的流程图

在这两个算例中, 系统 A, B 的每批料的原料总价格均为 75000 元/批料, 则系统 A, B 的输入焓成本为 2×10^{-4} 元/kJ. 系统 A 对资源的浪费引起的经济损失为 6652 元/批料, 该系统年产量为 108000 T, 即 6480 批料/a, 则系统 A 对资源的浪费引起的经济损失为 4310.5 万元/a; 系统 B 对资源的浪费引起的经济损失为 313 元/h, 该系统年产量为 30000 T, 生产时间为 7750 h/a, 则系统 B 对资源的浪费引起的经济损失为 243.35 万元/a.

表 1 聚氯乙烯悬浮聚合工艺流程 A 的焓衡算

项目	焓 EX	
	10^6 kJ/批料	%
输入焓		
1 点的原料(VCM, 添加剂, 水)	352.9800	90.3265
流化干燥器的外加热空气	37.8000	9.6730
7 点的补充氮气	0.0020	0.0005
合计	390.7820	100.0000
输出焓		
6 点的产品(PVC)	321.0000	82.1430
2 点的回收 VCM	35.1200	8.9871
总项	356.1200	91.1301
外部焓损失		
11	0.0234	0.0060
12	0.0025	0.0006
13	0.0133	0.0034
14	21.50	5.5018
15	0.0034	0.0009
16	0.0047	0.0012
17 + 18	0.7140	0.1827
总项	22.2613	5.6966
内部焓损失	12.4007	3.1733
焓损失总项	34.6620	8.8699
合计	390.7820	100.0000

系统对环境的影响可分为对自然环境和社会环境的影响, 则系统对环境的污染引起的经济损失也定义如下:

$$E_{\text{环境}} = E_{\text{自然环境}} + E_{\text{社会环境}} \cdot$$

(7)

系统对自然环境的污染引起的经济损失, 难于量化. 环境保护部门制定的征收的排污费标准以及企业的污染物处理费用(末端治理费用)可以在一定程度上反映此经济损失, 因此我们用两者之和来表示系统对自然环境污染所引起的经济损失, 见(8)式. 其中排污费又包括超标排污费、污水排污费和提高征收标准、加倍收费、滞纳金、补偿性罚款等¹⁾.

$$E_{\text{自然环境}} = E_{\text{排污费}} + E_{\text{处理费}}. \tag{8}$$

系统对社会环境的污染引起的经济损失, 可通过下面的公式来进行计算^[1]:

$$E_{\text{环境}} = \sum_i E_{i, \text{直接经济损失}} + E_{i, \text{间接经济损失}}, \tag{9}$$

式中 i 为系统的第 i 种排放污染物,

$$E_{\text{直接经济损失}} = E_{\text{医疗费}} + E_{\text{收入损失}}, \tag{10}$$

$$E_{\text{间接经济损失}} = E_{\text{过早死亡}} + E_{\text{误工}}. \tag{11}$$

表 2 聚氯乙烯悬浮聚合工艺流程 B 的焓衡算

项目	焓 EX	
	10 ⁶ kJ/h	%
输入焓		
2 点的原料(VCM, 添加剂, 水)	81.196	93.0453
16, 18, 19 点的外加蒸汽	6.069	6.9547
合计	87.265	100.0000
输出焓		
9 点的产品(PVC)	74.910	85.8420
15 点的回收 VCM	10.790	12.3646
总项	85.700	98.2066
外部焓损失		
3	0.790	0.9053
5	0.350	0.4011
8	0.380	0.4355
14	0.023	0.0264
总项	1.543	1.7683
内部焓损失	0.022	0.0251
焓损失总项	1.565	1.7934
合计	87.265	100.0000

表 3 系统 A 各排放物的物理焓和化学焓之和

排放物	水	空气	VCM	氮气	二氧化碳
焓损失 10 ⁶ kJ/批料	0.12	21.37	0.76	0.0006	0.00006

表 4 系统 B 各排放物的物理焓和化学焓之和

排放物	水	PVC	VCM
焓损失 kJ/h	55	1487863	56887

表 5 系统 A, B 的各排放物的危害系数

排放物	水	空气	VCM	氮气	PVC	二氧化碳
危害系数 B_i	0	0	10.5	0	0	4

1) 征收排污费法规汇编(1982~1996). 西安市环境监理处. 1997. 199~208

从表 3 和 4 中可以看出, 在此算例的排放物中, 只有氯乙烯单体和二氧化碳对环境造成污染. 而且由于二氧化碳的排放量很少, 所以为了简单起见, 只计算了氯乙烯单体对环境污染所造成的经济损失, 并将它作为系统对环境污染引起的经济损失.

氯乙烯单体是一种致肝癌、肝血管肿瘤的物质, 是造成劳动环境恶化和环境污染的主要物质. 1974 年 1 月在美国聚氯乙烯主要生产厂 B. F. Goodrich 公司所属工厂里, 因氯乙烯职业病造成 3 人因癌症死亡^[13]. 我们假设在本算例中, 因氯乙烯职业病死亡 1 人.

首先, 估算氯乙烯单体对自然环境污染所造成的经济损失. 系统 A 每年的污染物处理费用为 30 万元, 每年的排污费为 590 万元, 则系统 A 对自然环境污染所造成的经济损失为 620 万元; 系统 B 每年的污染物处理费用为 5 万元, 每年的排污费为 16 万元, 则系统 B 对自然环境污染所造成的经济损失为 21 万元. 这些污染物处理费用和排污费是根据国内几个生产厂家提供的聚氯乙烯年产量和年污染物处理费用以及年排污费计算得出的. 其次, 对系统对社会环境污染造成的经济损失进行估算, 其中的公式和经验数据均引自文献[1].

$$E_{\text{医疗费}} = PAR \cdot W \cdot C, \quad (12)$$

式中 PAR 为肝癌疾病氯乙烯污染百分比, 取 0.9; W 为人群肝癌疾病死亡人数, 取 1 人; C 为肝癌疾病医疗费用, 取 20 万元/(人 · a),

这样可得医疗直接费用为 18 万元/a.

$$E_{\text{收入损失}} = PAR \cdot W \cdot E_B, \quad (13)$$

式中, E_B 为平均过早死亡的直接收入损失, 取 6000 元/(人 · a).

这样可得过早死亡的直接收入损失为 5400 元/a.

$$E_{\text{误工}} = D \cdot PAR \cdot W \cdot m, \quad (14)$$

式中, D 为人均国民收入; 取 6000 元/(人 · a), m 为肝癌疾病导致的总误工时间, 取 2 年.

这样可得患病误工造成的经济损失为 10800 元/a.

本文中不考虑过早死亡造成的间接经济损失. 因此, 氯乙烯单体对社会环境污染造成的经济损失为 196200 元/a.

从而得到, 系统 A 对环境污染造成的经济损失为 640 万元/a, 系统 B 对环境污染造成的经济损失约为 40.62 万元/a.

取系统的资源效应系数为 1, 则系统 A 的环境效应系数 C'_2 为 $640 \div 4310.5 = 0.148$.

系统 B 的环境效应系数 C'_2 为 $40.62 \div 243.35 = 0.167$.

系统 A 的负效应为: $SNE = (34.6620 \times 10^6 + 0.148 \times 7980240) \times 6480 = 24519.3 \times 10^6 \text{ kJ/a}$.

系统 B 的负效应为: $SNE = 12167.5 \times 10^6 + 0.167 \times 4547.7 \times 10^6 = 12927.0 \times 10^6 \text{ kJ/a}$.

系统 A 的负效应因子为: $SNEF = 24519.3 \times 10^6 \div (390.782 \times 10^6 \times 6480) = 0.092$.

系统 B 的负效应因子为: $SNEF = 12927.0 \times 10^6 \div (87.265 \times 10^6 \times 7750) = 0.019$.

3 结果分析

(i) 从算例的计算过程和结果可以看出, 本方法综合考虑了系统的资源利用性和环境影响性, 并将两者通过效应系数有机地结合起来, 最终得到系统负效应这一能够全面评价化工过程系统的资源利用与环境影响评价的指标, 它可以作为系统进一步改进的优化目标. (ii) 从计算结果可以看出, 系统环境负效应系数较小, 这是由于在本文的评价方法中, 效应系数是用

经济损失来考虑的, 在当前的价格及排污费体系下, 资源的浪费在系统负效应中起主要作用. 但随着人们对环境保护愈来愈重视, 污染物排放标准会越来越低, 而超标罚款会越来越高, 环境影响在系统负效应中所占的比重会越来越大. (iii) 从计算结果中可以看出, 系统 A、B 对环境产生影响的主要污染物是氯乙烯单体. 所以, 对系统的改进, 应该主要从如何减少氯乙烯单体的排放量方面着手. 比如: 1) 采取效率更高的新式浆液汽提技术(如塔式汽提), 提高氯乙烯单体的回收率; 2) 采用废气焚烧技术, 进一步减少氯乙烯单体的排放量等等. (iv) 系统 B 的负效应因子比系统 A 的要小很多, 表明在资源利用性、环境影响性方面, 系统 B 要优于系统 A. 通过比较两者的流程, 不难看出原因所在, 系统 A 中未反应的氯乙烯单体的汽提是在反应结束以后直接在聚合釜内进行的, 尽管这样省了一个固定设备, 使流程简化, 但带来的后果是氯乙烯单体回收量少, 不仅浪费了原料, 而且加重了对环境的危害程度. 而系统 B 是通过回收槽和汽提塔完成此操作, 尽管增加了两个固定设备, 但最大限度地回收了氯乙烯单体, 既节约了原料, 又减轻了对环境的危害程度.

4 结论

本文在传统焓分析方法的基础上, 提出的综合考虑资源利用与环境影响的焓分析方法, 并对两个聚氯乙烯悬浮聚合工艺流程进行了计算, 介绍了该方法的计算步骤, 以及效应系数的确定方法. 从算例的计算过程和结果可以看出, 本方法拓宽了传统焓分析方法的应用范围, 可以全面地评价化工过程的资源利用性和环境影响性, 具有一定的科学性; 所得到的系统负效应这一评价指标, 可作为系统进一步改进的优化目标, 具有一定的工程应用价值. 最后通过对两个算例的计算结果进行分析比较, 进一步表明本方法能够全面评价化工过程系统的资源利用和环境影响, 并能够找出系统的薄弱环节, 为系统的改进提供建议.

参 考 文 献

- 1 徐嵩岭. 中国环境破坏的经济损失计量——实例与理论研究. 北京: 中国环境科学出版社, 1998. 7~9
- 2 Douglas J M. Process synthesis for waste minimization. *Ind Eng Chem Res*, 1992, 31(1): 238~243
- 3 Flower J R, Bikos S C, Johnson S W. The graphical mass balance in the early design of clean processes. *Tran of IChE, Part B*, 1993, 194~201
- 4 El-Halwagi M M, Manousiouthakis V. Synthesis of mass exchange networks. *AIChE J*, 1989, 35(8): 1233~1250
- 5 Wang Y P, Smith R. Wastewater minimization. *Chem Eng Sci*, 1994, 49(7): 881~1006
- 6 Pistikopoulos E N, Stefanis S K, Livingston A G. A methodology for minimum environmental impact analysis. *AIChE Symposium Series. Volume on Pollution Prevention Through Process and Product Modifications*, 1994, 90(303): 139~151
- 7 Stefanis S K, Livingston A G, Pistikopoulos E N. Minimizing the environmental impact of process plants: A process systems methodology. *Computers and Chemical Engineering*, 1996, 20: S1419~S1424
- 8 Rivero R. The exergoeconomic improvement potential of industrial processes. In: *Proc of TAIES'97, Beijing*. 1997. 299~304
- 9 Stefanis S K, Buxton A, Livingston A G, et al. A methodology for environmental impact minimization: Solvent design and reaction path synthesis issues. *Computers and Chemical Engineering*, 1997, 21: S1419~S1424
- 10 Rosen M A, Dincer I. On exergy and environmental impact. *International Journal of Energy Research*, 1997, 21: 643~654
- 11 Wang Yanfeng Feng Xiao. Exergy analysis involving resource utilization and environmental influence. *Computers and Chemical Engineering*, 2000, 24: 1243~1246
- 12 汪 晶, 和德科, 汪尧衢, 编译. 环境评价数据手册——有毒物质鉴定值. 北京: 化学工业出版社, 1988. 424~426
- 13 佐伯康治著. 化工生产闭路系统. 于浦义, 安家驹, 刘人侃译. 北京: 化学工业出版社, 1987. 43~58
- 14 项新耀. 工程焓分析方法. 北京: 石油工业出版社, 1990. 313~314