

几种典型高分子材料的生命周期评价

陈 红, 郝维昌, 石 凤, 王天民* (北京航空航天大学材料物理与化学研究中心, 北京 100083)

摘要: 利用生命周期评价方法(Life Cycle Assessment, LCA)讨论了 PE、PP、GPPS 及 PVC 4 种高分子材料的环境影响问题。结果表明, 材料生产的环境影响不仅与资源消耗有关, 而且与其各自的工艺环节有着密切的关系。此外, 采用不同的 LCA 方法得到的 4 种高分子材料的环境负荷的相对值虽然相差很大, 但其不同环境负荷之间的排序基本一致。

关键词: 高分子材料; 生命周期评价; 环境影响

Life cycle assessment of several typical macromolecular materials

CHEN Hong, HAO Weichang, SHI Feng, WANG Tianming (Materials Research Center for Physics and Chemistry, Beihang University, Beijing 100083)

Abstract: A life cycle assessment was carried out to discuss the environmental impacts of four types of macromolecular materials: PE, PP, GPPS, PVC. The research indicated that the environment impacts of these materials were not only related to resource consumption, but also with to respective techniques. Several different impact assessment methods were adopted to analyze the environmental impacts of the four types of macromolecular materials. The results showed that the absolute value of environmental load was different with different methods, but the ranking of environment load was almost uniform.

Key words: macromolecular materials, life cycle analysis (LCA), environmental impact

以高分子材料作为原材料的塑料产品一直以其体轻、性价比高、价格低廉等优点而广为应用, 因而使得塑料工业能成为我国的 4 大支柱材料产业而得到突飞猛进的发展, 近几年来, 我国塑料工业更是以每年平均 10% 以上的速度发展^[1]。然而, 塑料工业除了能给社会提供便利的服务外, 也有可能给人们的生活带来负面的影响。聚乙烯(polyethylene, PE)、聚丙烯(polypropylene, PP)、聚苯乙烯(polystyrene, GPPS)、聚氯乙烯(polychloride, PVC)是工程塑料中最典型的高分子材料。本文从我国的国情出发, 按照 ISO14040-43 中对生命周期评价方法(LCA)的定义对 4 大通用工程材料的环境影响进行了较为系统的评价。

1 目标和范围的定义

1.1 目标的确定

本文研究目的主要是采用 LCA 方法比较 PE、PP、GPPS、PVC 4 大通用工程塑料的环境影响, 以便更好地选用材料, 为塑料制品工业的生态设计提供参考。为了保证不同材料环境负荷排序的可靠性, 采用不同的环境影响评价方法对以上材料环境负荷进行定量的评估。

1.2 范围的确定

在评估 4 大材料生命周期的环境影响时, 本文研究的起止点放在原油的开采、原油的运输、原油的提炼、聚合体的生产、废物处置方面, 而材料的使用阶段不在本文考虑之列, 废物处

置则选择了有关文献^[2]中认为环境影响较大的填埋方式,而这种填埋方式也是在我国城市固体废弃物处置中被普遍采用的. 能源生产中所带来的环境排放按照各阶段的能耗比计入其中. 本评价范围选用的功能单元是 1000kg,采用的是 LCA 的简化模型^[3,4]. 此外,由于本文所研究的材料涉及到多产品系统,我们将各产品系统的输入和输出数据按照质量比例进行了分配^[5]. 本文评价中所使用的数据来源有:企业内部实际生产数据、工艺改进的设计数据、国家环境保护部门数据;我国相关的统计年鉴、文献等公开出版物^[6~8].

2 编目分析

2.1 工艺流程的确定

根据 1.2 所定义的系统边界和假设,给出以下 4 种材料的实际工艺流程图.

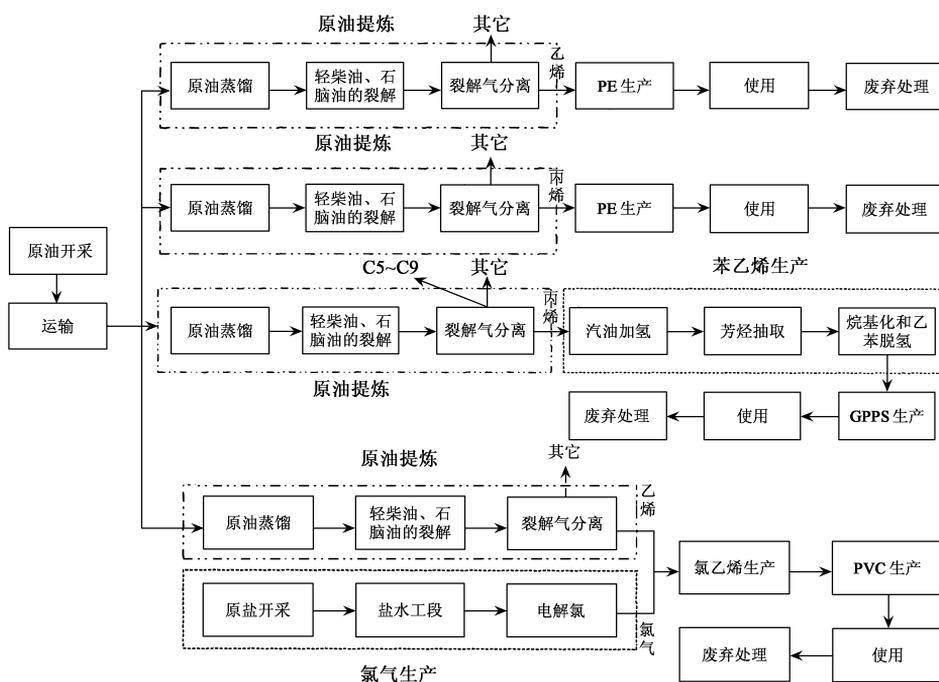


图 1 4 种材料的工艺流程图

Fig. 1 Flow chart of PE,PP,GPPS,PVC

2.2 编目数据的收集

根据图 1 所示的工艺流程图,整理每一生产过程的数据,可得到如下列表.

表 1 制备 1000 kg PE,PP,GPPS,PVC 的资源消耗

Table 1 The resource consumption of producing 1000kg of PE,PP,GPPS,PVC kg

化合物	消耗的资源/kg		化合物	消耗的资源/kg	
	原油	原盐		原油	原盐
PE	1.507	—	GPPS	1.975	—
PP	1.443	—	PVC	0.73	0.56

表 2 制备 1000 kg PE,PP,GPPS,PVC 的能耗与环境排放

Table 2 The energy consumption and environmental emission of producing 1000kg of PE,PP,GPPS,PVC

材料	工序	CO ₂ /kg	SO ₂ /kg	其它/kg	废水/t	废渣/kg	能耗/MJ
聚 乙 烯	原油开采	372.11	2.51		9.05	23.80	388.48
	原油运输	107.59	0.77				117.88
	原油分馏	92.74	0.40	NO _x :4.7 ×10 ⁻⁵	0.24	3.44	736.42
	石脑油等裂解	1482.67	4.61	NO _x :0.002	0.647	34.67	15231.72
	裂解气分离	3153.08	22.35			213.43	7524.65
	PE 生产	1191.53	11.89	乙烯:2.017	5.286	213.93	8428.77
	废弃填埋	8.78		NO _x :0.17CH ₄ :13.0			118.81
	原油开采	347.3	2.3		8.43	22.21	364.06
聚 丙 烯	原油运输	102.0	0.73				111.75
	原油分馏	86.59	0.37		0.23	3.23	687.68
	石脑油等裂解	1384.61	4.29	NO _x :0.002	0.6	32.35	14223.56
	裂解气分离	2944.61	20.83			199.31	7017.39
	PP 生产	1207.34	12.05	烃类:2.774	5.53	217.48	8591.2
	废弃填埋	8.78		NO _x :0.17CH ₄ :13.0			118.81
	原油开采	493.51	3.31		11.94	31.49	515.37
	原油运输	140.98	1.01				157.94
聚 苯 乙 烯	原油分馏	123.01	0.514	NO _x :4.87 ×10 ⁻⁵	0.317		977.68
	石脑油等裂解	1966.60	6.09	NO _x :0.0028	0.86	45.98	20201.69
	裂解气分离	4177.61	29.58			282.79	9969.48
	芳烃提取	788.75	5.50		0.91	53.19	4518.32
	乙烯和苯烷基化	2303.67	16.23			155.36	12159.16
	乙苯脱氢	6908.30	43.73		5.79	434.01	38224.43
	GPPS 生产	343.69	5.638	NO _x :0.146	4.14	51.69	3500.81
	废弃填埋	8.775		NO _x :0.171CH ₄ :13.0			118.81
聚 氯 乙 烯	原油开采	164.04	1.21		4.36	11.46	187.71
	原油运输	66.95	0.37				57.40
	原油分馏	44.65	0.19		0.116	1.66	354.67
	石脑油等裂解	713.97	2.22	NO _x :0.001	0.312	16.69	7334.6
	裂解气分离	1518.33	10.76			102.78	3623.41
	氯气生产	2279.87	20.18	Cl ₂ :7.6 ×10 ⁻⁵	4.665	314.5	17096.34
	氯乙烯生产	2440.23	24.61	EDC:4.93 CO:1.03	13.37	471.99	17035.06
	PVC 生产	1451.78	14.64	VCM:0.34 PVC:0.01	14.3	264.27	10135.0
废弃填埋	8.775		NO _x :0.171CH ₄ :13.0			118.81	

3 影响评价

3.1 编目数据分析

我们将材料的编目数据划分为资源消耗、能源消耗、废气、废水、废渣排放 5 个方面。分别针对 PE、PP、GPPS、PVC 这 4 种材料进行了比较,结果如图 2~图 4 所示,GPPS 在资源消耗、能源消耗、废气排放及废渣排放中影响最大,PVC 在能源消耗、废气排放及废渣排放中居其次,但其废水排放量最高,资源消耗最小。PE 与 PP 在这 5 项分类中影响相差不大。这种差别不仅源于资源的消耗不同,而且还与其各自的生产工艺相关。PE 与 PP、GPPS 同为石油化工的加工产品。由于 PE 与 PP 的上级原料乙烯、丙烯其化学结构相似,根据质量分配原理分配物耗,可知单位质量的乙烯和丙烯所消耗的原油基本相同,PE 和 PP 化学结构相似,生产过程也相似,因

而相同质量的 PE 和 PP 生产中消耗的乙烯与丙烯相近,其能耗及环境排放物也相似;而 GPPS 生产中所使用的上级原料是苯乙烯,苯乙烯是乙烯联产品 C6 成分的深加工产品,在质量分配中相同质量的苯乙烯和乙烯消耗原油之比约为 1.4:1,由此可知产品质量相同时,GPPS 原油消耗约是 PE 的 1.4 倍. 能耗方面,生产 GPPS 时,由于其苯乙烯生产工艺(主要是能耗大的乙苯脱氢工序)的加入,使得 GPPS 的能耗剧增,在这 4 种材料中能耗居于首位. 由于在实际生产中大量使用的是二次能源(如电、水蒸汽等),相应地由这些二次能源所带来的废气、废水、废渣排放量也随之增多;PVC 生产的主要原料是乙烯和氯气,其原料各占其生产物耗 43.6% 和 56.6%,生产中乙烯量的降低引起油耗的降低,这样使得生产相同质量的产品时,PVC 的原油消耗量显著低于其它材料. PVC 废水排放量的突增除了一部分是由氯气生产及氯乙烯生产环节所需大量电力生产带来的废水排放外,另一部分则是由于其独特的悬浮聚合工艺导致耗水量较大,因而使其整个生命周期阶段的废水排放总量在这 4 种材料中居于首位.

由此可见,资源消耗量越大,工艺环节越多,则材料生产过程中的能耗以及废气、废水、废渣排放量也越高.

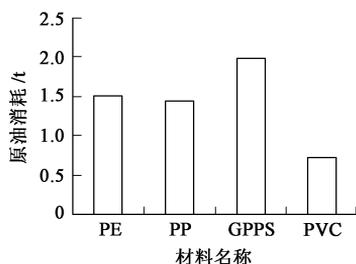


图 2 4 种材料资源消耗的比较

Fig. 4 The comparison of resource consumption of the four types of materials

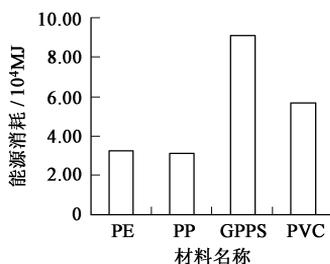


图 3 4 种材料能源消耗的比较

Fig. 3 The comparison of energy consumption of the four types of materials

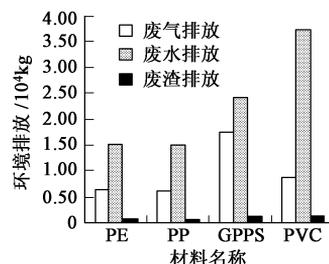


图 4 4 种材料环境排放的比较

Fig. 4 The comparison of environmental emission of the four types of materials

3.2 4 种材料环境负荷值的比较

为了能使环境影响表现得更加直观,我们尝试采用不同的 LCA 方法将 4 种材料的环境影响表示为单一的环境负荷值,鉴于采用的影响因子需具有可比性,这里我们选取了瑞士的 Eco-point 97 方法、荷兰的 CML2 baseline2000^[9] 及丹麦的 EDIP/UMIP96 方法^[10]. 上述 3 种方法均采用 SETAC LCA 的思想将环境影响进行分类表征,归一化后取权重,从而得到单一的环境负荷值. 我们按照这 3 种方法计算后,得到如下结果. 由图 5 看出,当使用这 3 种不同的方法进行环境负荷评价时,这 4 种材料的排列顺序大致为:GPPS > PVC > PE > PP,只是当我们采用 Ecopoint 方法时,由于固体废弃物的归一化因子与权重的影响,使得固体废弃物成为决定环境负荷大小的决定性因素,从而使得废弃物排放量最大的 PVC 成为 4 大材料中环境负荷最高的材料,但是由于 GPPS 材料生产的 CO₂、SO_x 的排放及能源消耗造成的环境负荷高于 PVC,这样使得 GPPS 的环境负荷与 PVC 的环境负荷差别不大;而当采用 EDIP/UMIP96 方法和 CML2 baseline2000 方法计算时,我们发现 GPPS 的环境负荷远高于 PVC 的环境负荷,这是因为此时采用的归一化因子及权重系数使得温室效应、人体毒害、酸化效应及资源消耗等影响因子共同决定总体环境负荷的大小,由于 GPPS 的这几项环境影响因子均高于 PVC,使得其环境负荷在这 4 种材料中也居于首位. 考虑到工业废渣可以回收利用,这样可以使得废渣对环境造成的负荷

值减小,由此我们可以按照 EDIP/UMIP96 方法和 CML2 baseline2000 方法得到的结论判断这 4 种材料环境负荷的高低,即:GPPS > PVC > PE > PP.

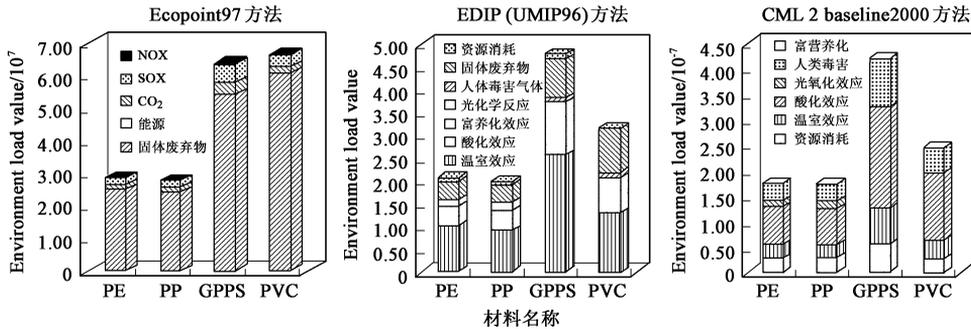


图 5 4 种材料的环境负荷值

Fig. 5 Environmental loading of the four types of materials

4 结论

1) 材料生产的能耗、废气、废水、废渣排放量的高低不仅取决于资源的消耗量,而且还与材料生产过程密切相关. 资源消耗量越大,工艺环节越多,则材料生产过程中的能耗以及废气、废水、废渣排放量也越高. 为了降低材料生产的环境负荷,必须采取资源回收利用、节约能源及工艺改善等措施. 2) 在 PE、PP、GPPS、PVC 这 4 种高分子材料中, GPPS 与 PVC 的环境负荷明显要高于 PE、PP. 因此在确保其性能符合要求的情况下,为了保护环境,建议尽量采用环境负荷值较小的 PE 和 PP. 3) GPPS 的生产因为苯乙烯的生产过程而导致其能耗以及废水、废渣、废气的排放量突增;而 PVC 的生产也因为氯气和氯乙烯的生产而导致其环境负荷增高,着重对其进行改善,会明显降低这两种材料的环境负荷. 4) 运用不同的 LCA 方法可以对以上 4 种高分子材料的环境负荷进行整体趋势上的评估,由于归一化因子与权重值的不同,结论会有一些出入. 具体应用时,我们也应该运用多种 LCA 影响评价方法并根据实际情况进行判断. 5) 值得注意的是,在工艺流程发生改变的情况下,材料的环境负荷可能发生变化. 本文中如果废弃物处置方式改为焚烧处理, PVC 由于剧毒致癌物质的排放,其环境负荷可能会排在首位.

参考文献:

- [1] 中国塑料工业年鉴编委会编. 2001 年中国塑料工业年鉴[M]. 北京:中国石化出版社,2001:303
- [2] 刘均科. 塑料废弃物的回收与利用技术[M]. 北京:中国石化出版社,2000:5
- [3] 郝维昌. 金属材料的环境负荷评价及 LCA 数据库的开发[D]. 兰州大学,2000:29
- [4] 寇昕莉. 高分子材料的环境负荷评价[D]. 兰州大学,2001:34
- [5] Heijungs R. Environmental life cycle assessment of products. [M]. Leiden: Centrum voor Milieukunde, 1992:27—28
- [6] 国家统计局. 中国统计年鉴(1998) [M]. 北京:中国统计出版社,1998:455—456
- [7] Craighill A L, Powell J C. Life cycle assessment and economic evaluation of recycling: a case study[J]. Resource Conservation and Recycling, 1996, 17(2): 75—96
- [8] Hunt, Robert G. LCA considerations of solid waste management alternatives for paper and plastic[J]. Resource, Conservation and Recycling, 1995, 37(1): 225—231
- [9] Furuholt E. Life cycle assessment of gasoline and diesel[J]. Resources, Conservation and Recycling, 1995, 14(3-4): 251—263
- [10] 杨建新,徐成,王如松. 产品生命周期评价方法及应用[M]. 北京:气象出版社,2002:39