

# 基于混合建模的城市垃圾厌氧发酵车用 沼气生命周期评价

黄 伟,张 欣

(北京交通大学 机械与电子控制工程学院,北京 100044)

**摘 要:**利用 ISO“生命周期评价原则与框架”,提出了混合建模(PELCA)的生命周期分析方法,对城市垃圾厌氧发酵车用沼气燃料进行了生命周期能耗和环境排放分析,并对安阳市垃圾厌氧发酵车用沼气燃料进行了生命周期评价.结果表明:城市垃圾厌氧发酵的沼气完全满足国标对车用压缩天然气(CNG)燃料的要求.在城市垃圾厌氧发酵车用沼气燃料生命周期中,全球变暖对环境的影响负荷贡献最大,气溶胶最小.车用沼气燃料生命周期环境影响负荷中,车辆运行阶段产生的环境影响最大,燃料阶段最小.城市垃圾厌氧发酵可以作为城市决策者处理垃圾方式的参考依据.

**关键词:**城市垃圾;厌氧发酵;车用沼气

**中图分类号:**X820.3

**文献标志码:**A

## Life cycle assessment of vehicle biogas production for anaerobic fermentation of municipal waste based on hybrid modeling

HUANG Wei, ZHANG Xin

(School of Mechanical, Electronic and Control Engineering, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China)

**Abstract:** By using ISO “life cycle assessment principles and framework”, energy consumption and environmental emissions of vehicle biogas life cycle for anaerobic fermentation of municipal waste are analyzed. Life cycle analysis method based on PELCA (Hybrid Life Cycle Assessment) hybrid modeling is proposed, and vehicle biogas for anaerobic fermentation of municipal waste in Anyang city is evaluated with life cycle assessment. The results show that the biogas fully meets the requirements of vehicle CNG (Compressed Natural Gas). In life cycle assessment of vehicle biogas, global warming is the largest contribution to the environmental impact load, and aerosol is the smallest. In environmental impact load of vehicle biogas fuel life cycle, the largest contribution to the environmental impact load is in vehicle operation phase, and the least is in fuel stage. The waste disposal methods for anaerobic fermentation of municipal waste could be used as reference information for urban policymakers.

**Key words:** municipal waste; anaerobic fermentation; vehicle biogas

随着城市人口的不断增长以及居民生活水平的迅速提高,各城区垃圾数量也在日益增加,并且垃圾类型呈现多样化趋势.由于垃圾的随处堆放影响着人们居住环境的美观,同时垃圾恶臭也影响着城区

居民的生活质量,因此城市垃圾问题已经成为城市最重要的民生问题之一<sup>[1-2]</sup>.而对城市垃圾进行厌氧发酵生产车用沼气,被认为是最有发展前途的处理方式,被越来越多的城市采纳和利用<sup>[3-4]</sup>.

收稿日期:2015-07-06

基金项目:北京市自然科学基金资助项目(3112020)

作者简介:黄伟(1975—),男,河南周口人,高级工程师,博士生.研究方向为载运工具运用工程. email:10116327@bjtu.edu.cn.

虽然车用沼气是一种清洁能源,但如果城市垃圾厌氧发酵生产过程中某些环节不清洁,或者发酵残余物使用不合理,也有可能给环境带来影响和危害,而生命周期评价(Life Cycle Assessment, LCA)能全面认识和比较城市垃圾厌氧发酵车用沼气生产过程各个环节的环境负荷,因此,对城市垃圾厌氧发酵车用沼气燃料进行生命周期的环境影响评价是十分必要的。

当前,在对城市垃圾生命周期的研究中,国内外学者主要集中在垃圾堆肥、焚烧,以及垃圾填埋技术的生命周期研究中<sup>[5-6]</sup>,缺乏对城市垃圾经过厌氧发酵转化为车用沼气燃料的生命周期研究。这些研究主要是通过对垃圾处理方式采用不同的工艺(卫生填埋、好氧堆肥、焚烧处理、综合处理)进行比较或是对城市垃圾各种处理系统进行生命周期评价,协助城市管理者设计适合未来发展的城市生活垃圾管理系统,并且采用不同的垃圾管理方案,包括城市垃圾分类收集、城市垃圾运输路线的减量化、对可回收物质的再循环利用,以及采取不同处理方式等所产生的环境影响差异。这些研究的范围基本包括了从城市垃圾产生,再经过收集和运输、分类,直到最终处置的整个过程<sup>[7-8]</sup>。

本文作者对城市垃圾厌氧发酵车用沼气燃料全生命周期的能耗和环境排放进行了系统分析,主要研究了车用沼气从原料获取至汽车消耗整个生命周期各个环节的能耗和对环境排放的影响,为城市垃圾厌氧发酵车用沼气燃料的使用和减少环境污染提供了理论支持。

## 1 车用沼气 LCA 目标与范围

### 1.1 研究目标

城市垃圾厌氧发酵车用沼气燃料 LCA 研究的目标,是提出了城市垃圾经过厌氧发酵生产车用沼气燃料的生命周期评价研究框架,并且根据车用沼气生命周期清单分析、环境影响评价中所提供的数据,对城市垃圾厌氧发酵车用沼气处理单元中的物质、各种能量的输入与输出、环境排放污染物的影响进行了分析和评价,为环境管理部门和政府职能部门确定垃圾处理方式、制定相关环境法规提供参考。

### 1.2 范围确定

城市垃圾厌氧发酵车用沼气燃料生命周期的范围从城市垃圾获取直至沼气汽车运行消耗整个生命周期的能耗和环境排放。具体包括城市垃圾厌氧发酵车用沼气燃料系统的各个单元阶段。按照生命周期评价方法,定义城市垃圾厌氧发酵车用沼气燃料

的生命周期系统边界,确定城市垃圾厌氧发酵车用沼气燃料系统的框架,主要框定 3 个阶段:①原料阶段,包括城市垃圾垃圾收集和运输、垃圾分拣;②燃料阶段,包括沼气生产、沼气净化、沼气储存、加气站;③汽车运行阶段,即汽车使用,发动机做功过程。其中沼气生产工艺如图 1 所示,研究范围如图 2 所示。城市垃圾厌氧发酵生产车用沼气生命周期的上游阶段包括了原料阶段、燃料阶段及汽车运行 3 个阶段,下游阶段包括汽车制造、汽车装配、汽车运行和汽车报废 4 个阶段。由于车用沼气燃料属于汽车新能源燃料,燃用沼气的车辆还处于小规模应用阶段,车辆的报废及回收利用所产生的环境影响难以估算,为此,本研究仅针对城市垃圾厌氧发酵车用沼气燃料上游阶段进行分析和研究。

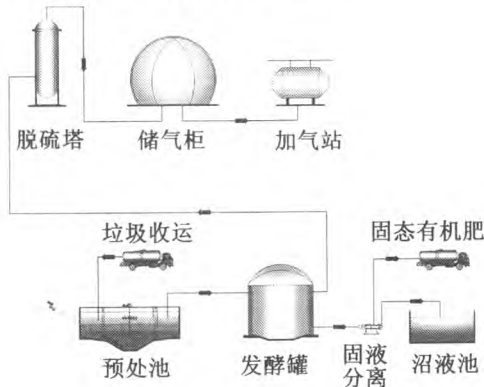


图1 沼气生产工艺

Fig.1 Biogas production process

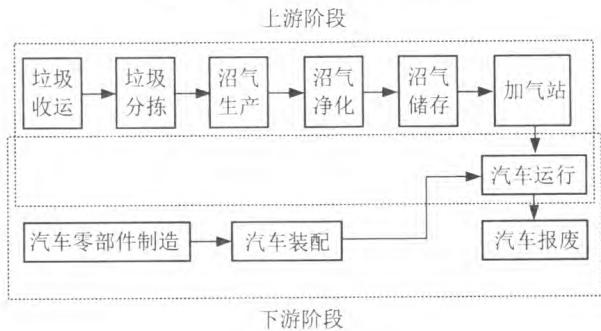


图2 系统界定

Fig.2 Systematic definition

### 1.3 基本假设

为了构造一个相对封闭的城市垃圾厌氧发酵车用沼气生命周期系统,以便计算车用沼气生命周期的能源消耗和环境排放,本文作者进行了以下假设:①对于城市垃圾分拣后的用于焚烧、填埋和可回收物质的组分不予考虑,假设通过分拣后的有机垃圾组分直接用做生产沼气的燃料。②对于一些辅助材料用量较小、所产生的环境负荷也较小(例如脱硫剂、添加剂等)的排除在评价范围之外。③对于土地、

厂房、设备等本身在形成过程中的能耗与环境排放等指标不予考虑。

2 车用沼气 LCA 模型

城市垃圾厌氧发酵车用沼气燃料生命周期评价方法有两种:①常规的基于过程的 LCA 方法(Process Life Cycle Assessment, PLCA);②经济投入产出 LCA 方法(Economic Input Output Life Cycle Assessment, EIOLCA)。PLCA 方法是一种从局部到整体的评价方法,考虑的是城市垃圾厌氧发酵车用沼气燃料生命周期的所有环节,它的统计范围从最初的城市垃圾原料获得,直至最终消耗完毕向自然环境排放的全部过程。理论上,这是一个无限扩展的供应链网络。但在实际的 LCA 实施中,对各种数据的统计是不可能做到细致入微的,一般只是研究对过程影响最大和最主要的部分,这就要求划分系统的边界。由于该过程不可避免地排除了系统的一小部分,使整个系统的边界定义和供应链划分都存在着截断误差,这种误差是 PLCA 方法无法克服的。而 EIOLCA 是一种基于国民经济各部门间生产投入和产出分析的 LCA 方法,它是针对基于过程的 LCA 方法中系统边界截断误差的缺陷而出现的,该方法的原理是基于宏观经济学中的投入和产出分析,其重要的组成便是投入产出表。由于 EIOLCA 使用了价值模型,因此使模型不能全部准确地反映部门之间的技术联系,同时,价值模型是按照部门划分的,虽然各个部门间有合并分解的灵活性,但由于各个部门划分的粗细不同,使得该模型反映的各个部门之间的联系也会受到直接影响,并且这种影响完全不是生产技术造成的。

常规的 PLCA 方法是“由底端至顶端”的建模方式,它从收集最底端细节的信息开始,即生产过程中各细节的输入和输出,然后再对这些细节的输入和输出进行汇总,从而得出总体的环境影响。EIOLCA 方法是由“顶端到底端”的建模方法,它是从国民经济总体影响到产品各个部门,该方法的建模始于国民经济,把国民经济划分为若干个产品部门,通过把产品与对应的产品部门相联系,然后得到基于各个部门的生产平均水平 LCA 结果。两种建模方法各有优缺点,而且在很多特性上是互补的,为此,本研究结合两者的优势,提出了城市垃圾厌氧发酵车用沼气燃料的混合建模生命周期评价(PELCA)方法,如图 3 所示。

PELCA 方法融合了 PLCA 和 EIOLCA 方法的优点,尽量避开两者的缺点,不仅可以节约时间和成

本,还可以提高研究结果的精度,非常适合城市垃圾厌氧发酵车用沼气燃料的生命周期研究。

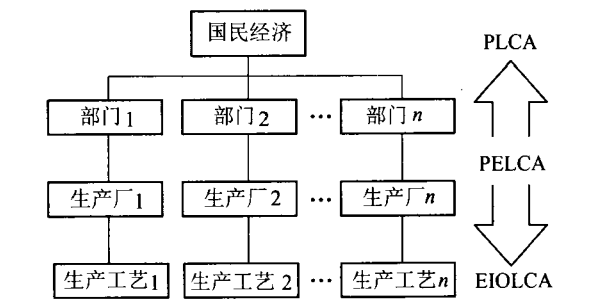


图 3 PELCA 生命周期评价方法  
Fig. 3 PELCA life cycle assessment method

在所建的 PELCA 模型中,城市垃圾厌氧发酵车用沼气燃料系统的环境影响  $E_{PE}$  可以表示为

$$E_{PE} = E_P + E_{IO} = E_P + R(I - A)^{-1}F \quad (1)$$
  
式中:  $E_P$  为 PLCA 的环境影响;  $E_{IO}$  为 EIOLCA 的环境影响;  $R$  为  $1 \times n$  产业活动所造成的环境直接影响系数;  $F$  表示  $n \times 1$  的最终需求向量;  $A$  为  $n$  阶技术方阵;  $I$  为单位  $n$  阶矩阵;  $(I - A)^{-1}$  称为完全需要系数矩阵,它的元素表示  $j(j = 1, 2, \dots, n)$  产业最终需求变化 1 单位,对  $i(i = 1, 2, \dots, n, \text{且 } i \neq j)$  产业产出的总影响,其求解利用国家统计局公布完全消耗系数矩阵,即可求得完全需要矩阵。

其中的关键数据  $R$  和  $A$  是跟特定的国家相联系的。 $A$  为国家统计局提供的公共数据,  $R$  为国家环境统计部门公布的数据。所以 EIOLCA 是和特定的国家或者地区相联系的。本研究采用统计部门颁布的公共数据经过处理得到了中国的  $R$  和  $A$  数据,建立了 PELCA 分析模型,如图 4 所示。

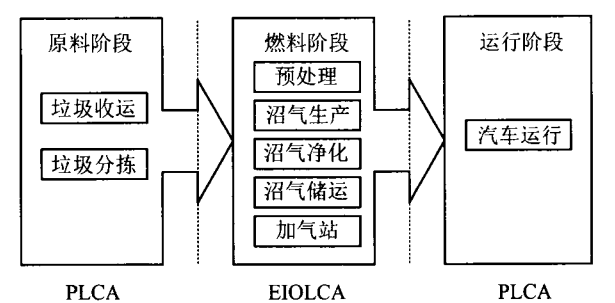


图 4 PELCA 生命周期分析模型  
Fig. 4 PELCA model

在原料阶段采用 PLCA 方法计算能耗和无机排放,因为垃圾收运和分拣都属于生命周期评价的相对集中型产品部门,其能耗和环境排放直接通过实际测量或者分析计算得到。

在燃料阶段采用 EIOLCA 方法计算能耗和环境排放,直接采用 PLCA 方法会因为系统不完全,而

导致比较大的截断误差,采用 EIOLCA 方法,根据沼气产品的生产工艺进行 PLCA 分解,然后再在此基础上根据投入产出表进行 EIOLCA 求解。

在汽车运行阶段采用 PLCA 方法计算能耗和环境排放,根据汽车实际测试实验,直接测量汽车能耗和废气排放。

3 车用沼气生命周期清单(LCI)分析

以河南安阳某垃圾生产沼气厂为分析对象,沼气生产厂与垃圾处理场在同一地区,距离安阳中心城区 18 km.该垃圾生产沼气厂设计日处理垃圾 700 t,年产车用沼气能力为 1 277.5 万 m<sup>3</sup>,产品除了车用沼气外,还有固体肥料、液体肥料和 CO<sub>2</sub>。

3.1 收运阶段能耗和环境排放

垃圾收运模式采用经过各类大小不同的垃圾转运站转运后,再经不同垃圾转运设备运输到最终处理场所(常见于大城市)的模式.城市垃圾收运过程一般包括 3 个部分:清运、转运和垃圾厂处理.其中清运阶段指垃圾收集车将垃圾从垃圾收集桶运至转运站的过程;转运阶段指城市垃圾收集车把转运站收集的垃圾运输到垃圾最终处理厂的过程;垃圾处理厂对有机垃圾的二次处理包括分拣和粉碎处理,分拣用于分离垃圾中的磁性金属和塑料,粉碎用于把垃圾中的有机物制作成生产沼气的进给原料.各种设备能耗及污染物排放情况经过计算如表 1 中“原料阶段”所示。

表 1 设备能耗和污染物排放  
Tab.1 Equipment energy consumption and pollutant emissions

排放过程	设备能耗	消耗量	污染物排放量 × 10 <sup>-3</sup> /(kg/t)								
			CO <sub>2</sub>	VOC	CO	NO <sub>x</sub>	PM10	SO <sub>2</sub>	CH <sub>4</sub>	NH <sub>3</sub>	H <sub>2</sub> S
原料阶段	垃圾车消耗柴油	1.2 L/t	1 520.4	0.900 0	4.6	1.80	3.9	1.2	1.5	—	—
	分拣机耗电	2.0 kW·h/t	1 524.0	0.582 0	2.3	9.08	2.5	8.68	7.8	5.2	6.4
	粉碎机耗电	1.7 kW·h/t	1 295.4	0.494 7	1.955	7.718	3.4	7.378	4.7	2.4	3.2
燃料阶段	预处理耗电	6 kW·h/t	4 572.0	1.746 0	6.9	27.24	7.5	26.04	23.4	15.6	19.2
	厌氧发酵耗电	13 kW·h/t	9 906.0	3.783 0	14.95	59.02	16.25	56.42	50.7	33.8	41.6
	沼气净化耗电能	2 kW·h/t	1 524.0	0.582 0	2.3	9.08	2.5	8.68	7.8	5.2	6.4
	贮存和输配耗电	2 kW·h/t	1 524.0	0.582 0	2.3	9.08	2.5	8.68	7.8	5.2	6.4
	加气站运行耗电	2 kW·h/t	1 524.0	0.582 0	2.3	9.08	2.5	8.68	7.8	5.2	6.4
汽车运行	车用沼气消耗	220 g/(kW·h)	59 466.0	235.5	71.6	166.95	—	—	235.5	—	—

3.2 车用沼气生产过程中的能耗和污染物排放

沼气生产过程包括预处理,厌氧发酵,沼气净化,沼气贮存和输配,加气站运行 5 个环节.其中厌氧发酵过程是密封、隔绝空气的,所以不考虑期间的污染物排放,其他环节都会消耗电能维持运行及产生排放物。

在生产沼气过程中,部分沼气用于加热锅炉以便给发酵室保温,这部分沼气产生的能量属于系统的内能量流动,不再计入生命周期影响.同时发酵期间系统摄入的太阳能及生物能也不计入系统生命周期.按照我国 2007 年投入产出表,各阶段的能耗和环境排放数据如表 1“燃料阶段”所示。

净化后的沼气经过现场测定以及计算,其成分和含量如表 2 所示,可以看出,车用沼气气质检测中的高位发热量、总硫、H<sub>2</sub>S、CO<sub>2</sub>、水露点等指标都满足 GB 18047—2000 车用压缩天然气标准。

表 2 车用沼气成分和含量

Tab.2 Vehicle biogas composition and content			
分析项目	烃类体积 分数/%	分析项目	非烃类分数 与标准值
CH <sub>4</sub>	97.97	O <sub>2</sub> /%	0.101<0.5
C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>	0.39	CO <sub>2</sub> /%	0.227<3.0
C <sub>3</sub> H <sub>8</sub>	0.149	H <sub>2</sub> S/(mg/m <sup>3</sup> )	0.00262<15
i-C <sub>4</sub> H <sub>10</sub>	0.057	总硫(以硫计)/(mg/m <sup>3</sup> )	73.890<200
n-C <sub>4</sub> H <sub>10</sub>	0.023	水露点/℃	-19.012<-13
i-C <sub>5</sub> H <sub>5</sub>	0.014	高位发热量/(MJ/m <sup>3</sup> )	39.168>31.4

3.3 车辆运行试验阶段能耗和污染物排放

车用沼气的主要成分是甲烷(CH<sub>4</sub>),属于车用新能源燃料,为了准确测试车辆能耗和排放,采用整车普通道路测试试验方法.沼气发动机采用潍柴 WT615 天然气发动机,其压缩比为 10.5,额定功率为 180 kW,额定转速为 2 200 r/min,这种发动机被大量用于总质量 16 t 至 40 t 级斯太尔系列重型载货汽车及城市公交客车中,占国产燃气发动机 40%

以上的市场份额.将该燃气发动机装配在市场占有率很高的常州客车厂 CJ6110G1Y10H 客车上,进行沼气城市公交客车的燃料消耗和环境排放测试,试验结果如表 1“汽车运行”所示.

4 车用沼气生命周期环境影响评价

城市垃圾厌氧发酵车用沼气燃料的生命周期环境影响评价,指的是对其生命周期清单数据中所提供的环境排放污染物,对潜在的环境影响程度进行定性以及定量评价的过程.因为城市垃圾生产车用沼气系统生命周期中各个阶段的 LCI 数据仅仅反映了各阶段的环境污染物排放数值,不能直观反映对环境影响程度的大小,为此,通过建立模型,将 LCI 提供的结果转换成一套通用的影响尺度,从而得到城市垃圾厌氧发酵沼气车用燃料系统对环境影响潜力的评价.根据实际的需求,选取了分类、特征化、量化(包括标准化和加权),最后得到综合评价结果.

4.1 环境影响分类

本研究将环境影响类型分为酸化、全球变暖、光化学烟雾、富营养化和气溶胶 5 个类型.根据国际政

府间气候变化专门委员会(Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC)的建议,全球变暖选用 CO<sub>2</sub> 作为当量因子,用于定量衡量各温室气体因子对全球变暖的影响;采用 NO<sub>3</sub><sup>-</sup> 表述富营养化程度;采用 C<sub>2</sub>H<sub>4</sub> 表示光化学臭氧的合成潜力;采用 SO<sub>2</sub> 描述酸化潜力;采用 PM<sub>10</sub>表述气溶胶影响.

4.2 特征化

特征化是选择一种衡量生命周期环境影响的方式,通过采用特定的评估模型,把不同的排放因子或负荷对环境的影响进行分析,并量化成为具有相同的形态或单位的大小.经过特征化之后,最终得到了一个数字化的指标.本文作者采用环境排放影响的总和用公式表示为

$$E(i) = \sum E(i)_j = \sum (q_j \times \lambda) \tag{2}$$

式中:  $E(i)$  为车用沼气系统对第  $i$  种潜在环境影响的贡献大小;  $E(i)_j$  为车用沼气系统第  $j$  种排放污染物对第  $i$  种潜在环境影响的贡献值;  $q_j$  为第  $j$  种物质排放值;  $\lambda$  为第  $j$  种排放污染物对第  $i$  种潜在环境影响的当量值.各环境影响因子与参照物之间的当量关系如表 3 所示.

表 3 环境影响负荷  
Tab.3 Environmental impact load

影响类型	影响因子	参照物	当量值	排放量/(kg/t)	影响潜值	标准化基值	标准化潜值	权重因子	影响负荷
全球变暖	CO <sub>2</sub>	CO <sub>2</sub>	1	82.855 8	187.626 8	8 700	0.021 56	0.82	0.017 68
	CH <sub>2</sub>		25	0.347 0					
	CO		2	0.109 2					
	NO <sub>x</sub>		320	0.299 1					
酸化	NO <sub>x</sub>	SO <sub>2</sub>	0.7	0.299 1	0.640 1	35	0.018 29	0.73	0.013 35
	SO <sub>2</sub>		1	0.125 8					
	NH <sub>3</sub>		1.88	0.072 6					
	H <sub>2</sub> S		1.88	0.089 6					
富营养化	NO <sub>x</sub>	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	1.35	0.299 1	0.668	59	0.011 32	0.74	0.008 377
	NH <sub>3</sub>		3.64	0.072 6					
光化学烟雾	CH <sub>4</sub>	C <sub>2</sub> H <sub>2</sub>	0.006	0.347 0	0.115 6	25	0.004 624	1.3	0.006 011
	NO <sub>x</sub>		0.028	0.299 1					
	CO		0.030	0.109 2					
	VOC		0.416	0.244 8					
气溶胶	PM <sub>10</sub>	PM <sub>10</sub>	1	0.041 05	0.041 05	18	0.002 281	0.61	0.001 391

4.3 量化(标准化和加权评估)

特征化结果仅仅能够针对同一种影响类型对不同的生命周期单元进行比较分析,因为特征化结果比较分散并且涉及的方面较多,很难用特征化结果来判断哪一个生命周期单元更优或哪一种产品更好,所以,需要把这些经过分类的特征化结果进行综合,用来确定不同环境影响类型的权重大小,以便把所有的具体环境影响类型的特征化结果汇总为一个总的影响水平值.消除它们在量纲上差异的标准化

处理公式为

$$N_i = \frac{C_i}{S_i} \tag{3}$$

式中:  $N_i$  为第  $i$  类环境影响类型的标准化处理结果;  $C_i$  为第  $i$  类环境影响类型的特征化处理结果;  $S_i$  为第  $i$  类环境影响类型标准化处理基准量.

城市垃圾经过厌氧发酵生产车用沼气的生命周期环境影响总水平值 TLCA 为各类型影响的加权和,即

$$TLCA = \sum_i N_i \omega_i \quad (4)$$

式中:  $\omega_i$  为相应影响类型的权重. 城市垃圾厌氧发酵车用沼气燃料生命周期量化结果如表3所示.

从表3可以看出,城市垃圾厌氧发酵车用沼气燃料对环境造成的影响负荷中,因为城市垃圾处理产生的沼气中主要成分是  $CH_4$  和  $CO_2$ , 燃烧产物主要是  $CO_2$ , 而  $CH_4$  和  $CO_2$  这两种物质是重要的温室气体, 因此全球变暖的环境影响负荷贡献最大, 其次分别为酸化、富营养化、光化学烟雾, 气溶胶的环境影响负荷最小. 车辆燃烧沼气燃料时, 基本不产生微粒, 沼气生产过程中也不产生微粒, 因此气溶胶的环境影响负荷贡献最小.

#### 4.4 阶段环境影响分析

车用沼气生命周期系统环境影响产生的总负荷为  $4.68 \times 10^{-2}$  人/t, 其中生命周期各个阶段产生的环境影响负荷大小如图5所示. 图中可见, 在城市垃圾厌氧发酵车用沼气燃料生命周期过程中, 车辆运行阶段产生的环境影响最大, 占整个生命周期的45%; 其次为原料阶段, 占42.6%; 燃料阶段最小, 仅占12.3%.

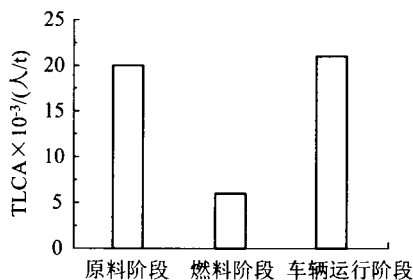


图5 车用沼气燃料生命周期环境影响负荷值

Fig.5 Vehicle biogas lifecycle environmental impact load

## 5 结论

1)建立了城市垃圾厌氧发酵车用沼气燃料生命周期 PELCA 混合分析模型, 该模型可以节约时间和执行成本, 提高研究结果的精度.

2)城市垃圾厌氧发酵的车用沼气燃料完全满足 GB 18047—2000 车用压缩天然气标准的要求, 为城市垃圾处理减少污染和土地资源、生产新能源找到了方向.

3)在城市垃圾厌氧发酵车用沼气燃料系统中, 对环境影响负荷贡献最大的是全球变暖, 其他依次为酸化、富营养化、光化学烟雾和气溶胶.

4)车用沼气燃料生命周期环境影响负荷中, 车辆运行阶段产生的环境影响最大, 燃料阶段最小.

#### 参考文献 (References):

- [1] 杨建新, 王如松, 刘晶如. 中国产品生命周期影响评价方法研究[J]. 环境科学学报, 2001, 21(2): 234-237.  
YANG Jianxin, WANG Rusong, LIU Jingru. Methodology of life cycle impact assessment for Chinese products[J]. ACTA SCIENT IAE CIRCUMSTANT IAE, 2001, 21(2): 234-237. (in Chinese)
- [2] Birgisdoótiir H. Life cycle assessment of disposal of residues from municipal solid waste incineration: recycling of bottom ash in road construction or landfilling in Denmark evaluated in the ROAD-RES model[J]. Waste Management, 2007, 5(27): 75-84.
- [3] Reich M C. Economic assessment of municipal waste management systems - case studies using a combination of life cycle assessment (LCA) and life cycle costing (LCC)[J]. Journal of Cleaner Production, 2005, 13(8): 253-263.
- [4] Chaya W, Gheewala S H. Life cycle assessment of MSW-to-energy schemes in Thailand[J]. Journal of Cleaner Production, 2007, 15(15): 1463-1468.
- [5] Kim M H, Kim J W. Comparison through a LCA evaluation analysis of food waste disposal options from the perspective of global warming and resource recovery[J]. Science of the Total Environment, 2010, 408(19): 3998-4006.
- [6] Chen D, Christensen T H. Life-cycle assessment (EASE-WASTE) of two municipal solid waste incineration technologies in China[J]. Waste Management & Research, 2010, 28(6): 508-519.
- [7] Chang N B, Qi C, Islam K. Comparisons between global warming potential and cost-benefit criteria for optimal planning of a municipal solid waste management system[J]. Journal of Cleaner Production, 2012, 20(12): 1-3.
- [8] Bernstad A, la Cour Jansen J. Review of comparative LCAs of food waste management systems-current status and potential improvements[J]. Waste Management, 2012, 32(12): 2439-2455.