

赵福全, 陈轶嵩, 刘宗巍, 等. 考虑报废回收的汽车发动机全生命周期环境影响评价研究[J]. 环境科学与技术, 2016, 39(12): 189-193. Zhao Fuquan, Chen Yisong, Liu Zongwei, et al. Study on impact assessment of life cycle environment of automobile engine considering scrap recycling [J]. Environmental Science & Technology, 2016, 39(12): 189-193.

# 考虑报废回收的汽车发动机全生命周期环境影响评价研究

赵福全, 陈轶嵩\*, 刘宗巍, 郝瀚

(清华大学汽车产业与技术战略研究院, 汽车安全与节能国家重点实验室, 北京 100084)

**摘要:** 该文构建了考虑报废回收环节的汽车发动机全生命周期环境影响评价模型, 并选取某企业生产制造的某款发动机作为实证研究对象, 采集清单数据代入模型计算包括报废回收阶段在内的发动机全生命周期环境影响潜值, 根据结果可分清全生命周期各阶段的责任, 综合各种因素对一些主要贡献指标做到有的放矢。研究结果表明, 材料回收再利用省去了原材料开采、冶炼等诸多环节, 可有效降低发动机对生态环境的影响, 未来轻量化、再制造、材料再循环等绿色技术路径是发动机节能减排的重要手段, 通过形成减量化、再制造、再使用、再再利用的 4R 循环体系可更加有效地挖掘出发动机的全生命周期节能减排潜力。

**关键词:** 发动机; 全生命周期; 报废回收; 环境影响评价

中图分类号: X24 文献标志码: A doi: 10.3969/j.issn.1003-6504.2016.12.032 文章编号: 1003-6504(2016)12-0189-05

## Study on Impact Assessment of Life Cycle Environment of Automobile Engine Considering Scrap Recycling

ZHAO Fuquan, CHEN Yisong\*, LIU Zongwei, HAO Han

(State Key Laboratory of Automotive Safety and Energy, Automotive Strategy Research Institute, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

**Abstract:** This paper built a calculation model considering the recovery of automobile engine whole life cycle environmental impact assessment, and selected the engine that was manufactured by Weichai as the empirical research object. The inventory data are substituted into the model to calculate gas emissions and toxic harmful substances produced by the engine of the whole life cycle, then coming ultimately to the standardization of environmental impact equivalent evaluation results. The results can distinguish the responsibility of the whole life-cycle phases, and various factors contribution to some of the key indicators for a definite purpose. The results show that the material recycling reuse is an important way to reduce gas emissions, since the metal materials recycled saves raw materials mining, smelting and other process. In the future lightweight, re-manufacturing, material recycling and other green development direction is an important means of engine energy conservation, by forming, reduction, remanufacturing, reuse and recycling, 4R circulation system can more effectively tap the full life cycle of the engine reduction potential.

**Key words:** engine; life cycle; recalling; environmental impact assessment

发动机作为汽车的核心部件, 在构建汽车绿色产业链的过程中面临节材、节能和减排的挑战, 而发动机对资源、能源和环境的影响如何是绿色发展首先应该厘清的问题, 必须通过全生命周期评价才能得出科学可靠、定量准确的结论。

从目前获取的国内外文献来看, 虽有学者对发动机的全生命周期进行了一些探索, 但大多是针对单目标或者部分阶段的计算分析, 并且对报废后的材料回收考虑不足。国内外有部分学者用相关方法对各种汽车零部件展开了诸多有益的探讨可供本文参考借鉴。

《环境科学与技术》编辑部 (网址) <http://fjks.chinajournal.net.cn> (电话) 027-87643502 (电子信箱) [hjkxyjs@vip.126.com](mailto:hjkxyjs@vip.126.com)

收稿日期: 2016-03-21; 修回日期: 2016-08-04

基金项目: 中国工程院咨询项目“制造强国战略研究(第二期)”(2015-ZD-07); 工业和信息化部项目“汽车节能技术评价体系及相关政策措施研究”(工信装函[2013]506号)

作者简介: 赵福全(1963-), 男, 教授, 博士生导师, 目前主要从事汽车产业发展、企业运营与管理、技术发展路线等领域的战略研究; \* 通讯作者 (电子邮箱) [chenyisong\\_1988@163.com](mailto:chenyisong_1988@163.com)。

如对变速器材料由镁换为铝<sup>[1]</sup>、汽车油箱材料由钢变为高密度聚乙烯塑料<sup>[2]</sup>、前悬架材料由镁合金换成碳钢<sup>[3]</sup>缸盖及轮辋铝合金替代钢制产品的前后环境影响评价进行计算分析<sup>[4-5]</sup>；在可回收设计领域，对汽车聚烯烃门板可回收性设计前后 2 种方案进行差异评价<sup>[6]</sup>，对比分析不同汽车塑料件的回收设计方案<sup>[7]</sup>，计算汽车制动系统几种可回收性、可拆解性设计方案的减排效果等<sup>[8]</sup>。以上研究主要侧重对产品生命周期前段材料生产、制造装配以及运行使用环节的分析，尚未系统、全面地从理论角度研究报废回收对汽车产品环境影响的正负收益。此外，大多采用国外数据，缺乏针对我国工业水平的国内数据，导致评价结果的可靠性大打折扣。本文在借鉴汽车零部件生态效益评价研究相关方法思路的基础上<sup>[9-10]</sup>，构建考虑报废回收的汽车发动机全生命周期环境影响评价计算模型，并利用国内数据选择某企业生产的发动机进行了实证研究，评价结果可有效指导企业技术升级，同时为今后发动机的绿色发展指明了方向。

## 1 评价模型

汽车全生命周期节能减排评价模型通常包括材料评价(M)、能源评价(E)与排放评价(P)三大模块<sup>[11-12]</sup>，本文研究的目标是计算排放评价模块，即量化各种排放物对生态环境的影响潜值，针对汽车发动机的节能减排特点，加入了报废回收环节，构建了针对发动机生命周期环境影响评价的理论计算模型，如下所述。

发动机报废回收包括发动机报废、拆解、清洗、检测、再制造、破碎、材料回炉、循环利用、能量回收、焚烧填埋等多个环节(由于再制造环节很复杂，本文暂不考虑)。发动机报废回收的各个环节将会产生各种排放物，但同时由于材料回炉、循环利用和能量回收等环节又会减少原矿石开采等环节的排放。本文将构建模型计算排放物增加部分和减少部分对环境影响的收益，分别定义为正收益和负收益。排放值为正值即定义为正收益，排放值为负值(即该环节从生命周期视角有效减少了排放量)则定义为负收益，正、负收益的叠加值即为报废回收阶段各种排放物的实际数值。

设发动机全生命周期各个环节的正收益用矩阵  $P^+$  表示，负收益用矩阵  $P^-$  来表示，则整个生命周期各个环节的各种排放物的排放值矩阵  $P$  可表示为：

$$P = \sum_{i=1}^n (P_i^+ + P_i^-) \quad (1)$$

式(1)中  $P_i^+$  的值为正， $P_i^-$  的值为负， $n$  表示包括划分的包括报废回收在内的发动机生命周期阶段数。

正、负收益的叠加矩阵  $P$  由发动机产品类型、企

业生产水平、装配车型等不同条件综合决定的，可能为正，也可能为负。本文将在实证研究中根据计算结果进一步展开解释公式(1)的内涵。

接下来，在计算各种污染物对应的环境影响特征化值时只需将相应排放物数值乘上相应的特征化系数，然后在对结果进行求和即可，如公式(2)所示。

$$T_k = \sum (P_i \times C_i) \quad (2)$$

式(2)中  $T_k$  表示第  $k$  种影响评价指标的环境影响潜值； $P_i$  表示第  $i$  种污染物的质量； $C_i$  表示第  $i$  种污染物对应的特征化因子。

本文选取全球变暖(GWP)、酸化(AP)、水体富营养化(EP)、光化学烟雾(POCP)、人体健康(HTP)、固体废弃物(SW)等 6 种环境影响类型作为评价汽车发动机对生态环境影响的主要指标。最后根据 CML 方法将各种环境排放物对生态环境的影响潜值进行特征化计算，根据公式(2)可得出原材料生产、零部件制造、车辆运行使用、报废回收阶段相应的 GWP、AP、EP、POCP、HTP 和 SW 值，为实证研究的相关评价计算和清单采集工作做好准备。

## 2 清单数据

本文获取某企业生产制造的汽车发动机进行实证评价研究，根据模型对清单数据的要求，深入该企业采集了发动机主要 BOM 表、加工制造排放、装配车型等清单数据，同时根据企业技术人员对发动机回收利用的数据积累，二次处理相关数据。由于部分数据涉及企业机密，在此仅给出部分且可公开的 BOM 表清单数据。

根据模型要求，首先需得到发动机主要零部件的 BOM 表，根据 BOM 表汇总出该款发动机的部件总成或零件组成清单，如表 1 所示。发动机的生产车间的排放数据，根据各项工艺的工时统计数据进行了采集，最终得到单台发动机生产过程各种直接排放物的平均值，然后再根据单台发动机的能耗对应的间接排放值再进行累加得出生产制造过程的排放值。

表 1 汽车发动机部分总成及零部件的 BOM 表  
Table 1 BOM table for parts

名称	材料	总质量/kg	名称	材料	总质量/kg
缸体总成	铸铁	280.00	油底壳	钢	10.00
缸盖总成	铸铁	90.00	空压机总成	合金钢	30.00
曲轴总成	合金钢	150.00	增压器总成	铸铝	24.50
连杆总成	合金钢	26.00	喷油器总成	合金钢	2.00
飞轮壳	铸铁	30.00	进气管总成	铝合金	12.00
凸轮轴	钢	23.00	排气管总成	铝合金	15.00
挺柱	钢	8.00	橡胶管	橡胶	4.50
摇臂	钢	16.00	活塞	硅铝	21.00

对于装配车型数据,需首先获取该款发动机配套车型的排量、整备质量、各种工况油耗、年均行驶里程、行驶年限等数据,然后根据模型计算需要进行数据修正和部分等价替换后使用。

对于回收利用部分的数据,报废拆解过程由企业提供能耗数据,换算成一次能源对应的排放后使用,材料回炉数据根据材料生命周期清单分析二次处理后使用,能量回收和焚烧填埋的数据引用经验值计算,对于过程非常复杂的再制造环节很复杂,本文暂不考虑,后续可以做进一步的深入研究和探讨,再制造过程也同样存在正、负收益的问题,可基于公式(1)

和公式(2)细化具体的计算方法。

### 3 评价结果

根据构建的评价模型,本文材料生产、再循环、回炉处理的基础数据引用四川大学 eBalance 软件中的 CLCD 数据库和四川大学王洪涛教授的相关文献数据<sup>[13-16]</sup>,同时将获取的发动机清单数据和引用采集的各类数据代入评价模型的 Excel 基础表格中计算得出该款发动机的全生命周期环境影响潜值计算结果,如表 2 和图 1~4 所示。根据表 2 以及图 1~4 的计算结果可以看出以下 3 点结论:

表 2 汽车发动机全生命周期各阶段的各种类型环境影响潜值  
Table 2 Various types of environmental impacts at each stage of the life cycle of the engine (无量纲)

LCA 分析	原材料生产阶段	零部件制造阶段	车辆运行使用阶段	报废回收阶段	合计
GWP	45.65 E-13	45.39 E-13	15.54 E-11	38.39 E-14	16.49 E-11
AP	46.73 E-13	52.37 E-13	13.42 E-12	-65.33 E-14	22.68 E-12
EP	23.8 E-14	28.54 E-14	21.65 E-13	-38.58 E-15	26.50 E-13
POCP	30.65 E-13	24.72 E-13	63.86 E-12	58.07 E-14	69.98 E-12
HTP	40.94 E-14	10.65 E-15	58.41 E-14	-10.74 E-15	99.34E-14
SW	31.45 E-12	23.57 E-14	42.35 E-14	-12.89 E-12	19.22 E-12
合计	44.41 E-12	12.78 E-12	23.59 E-11	-12.64 E-12	28.04 E-11

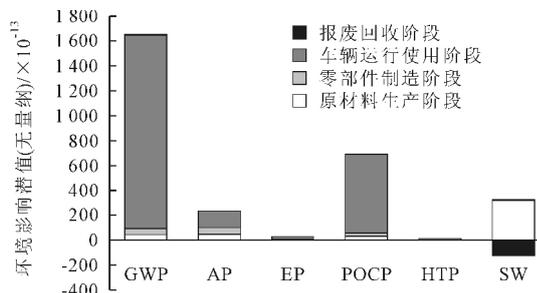


图1 汽车发动机全生命周期的各种类型环境影响潜值  
Fig.1 Various types of environmental impacts of the life cycle of the engine

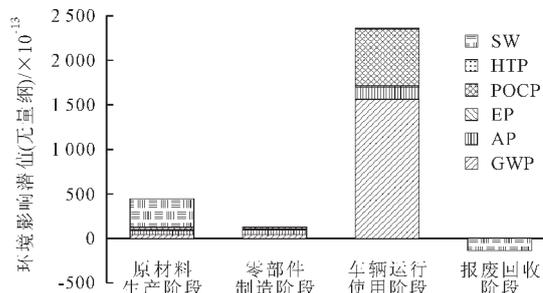


图3 汽车发动机全生命周期各阶段的环境影响潜值  
Fig.3 Environmental impacts at each stage of the life cycle of the engine

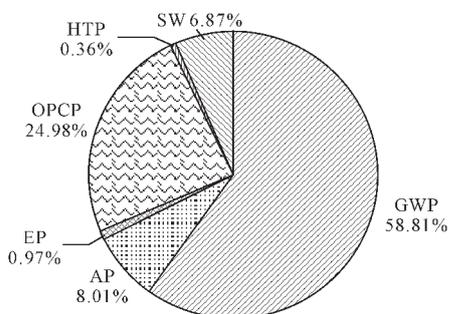


图2 汽车发动机全生命周期的各种类型环境影响潜值的占比  
Fig.2 Proportion of environmental impacts of the engine in life cycle

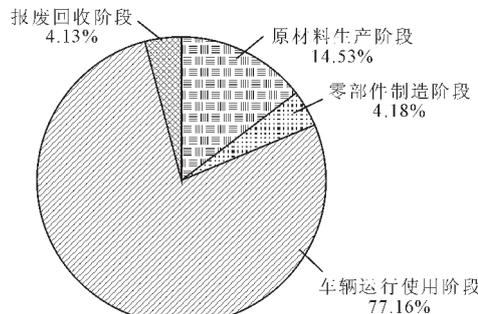


图4 汽车发动机全生命周期各阶段的环境影响潜值的占比  
Fig.4 Proportion of environmental impacts of the engine at each stage

(1)在各种环境影响类型中,GWP 的值最大,占到了 58.81%,即温室气体排放是汽车发动机全生命周期过程对生态环境的主要影响类型,这主要是由于排

放物中 CH<sub>4</sub>、CO<sub>2</sub> 数值较大,从而直接导致温室效应加剧,当前应把碳排放作为一个突破口来降低发动机对生态环境的影响。

(2) 报废回收阶段的综合环境影响潜值为负值, 虽然 GWP、POCP 的值仍为正, 但 AP、EP、HTP、SW 等其他 4 种环境影响潜值为负, 综合值仍为负值, 而且大多数涉及有毒有害物质的环境影响类型为负。说明对于该款发动机产品而言, 通过报废回收处理可有效降低对生态环境的影响, 尤其是降低有毒有害物质的量。

(3) 报废回收阶段的 SW 负绝对值明显, 这主要是由于报废回收阶段的材料回收再利用环节降低了大量的原矿石采矿、冶炼加工等环节的排放值, 而在原矿石开采过程中会留下一些尾矿, 如何做好尾矿的再循环利用对于生命周期而言, 也是材料生产过程中未来需要解决的一个问题, 以此来进一步降低一次材料生产过程的固体废弃物量。

#### 4 总结与展望

本文通过构建模型、采集数据、实证研究, 主要计算了包括报废回收阶段在内的某款汽车发动机生命周期对生态环境的影响, 可以从以下 4 个方面对全文进行总结和展望:

(1) 从整个生命周期视角来看, 在汽车发动机的材料制备阶段就会产生一系列污染排放, 直到产品寿命周期结束的回收利用后端仍然会产生对环境的影响, 与汽车发动机相关的环境影响潜值会贯穿整个生命周期达 15~20 a 之久。通过全生命周期环境影响评价, 可以分清各个阶段责任, 综合各种因素对一些主要贡献的环境影响潜值做到有的放矢。

(2) 从整个汽车发动机的生命周期来看, 车辆运行使用阶段的环境影响潜值最大, GWP 在 6 种环境影响类型中占比最高而报废回收阶段环境影响潜值为负值。因此降低碳排放对应的温室效应潜值仍然是现阶段汽车发动机绿色化的主要方向。而车辆运行使用阶段唯有通过先进动力总成技术以及各种节能技术的优化组合及匹配才能够提高动力系统的效率, 降低使用阶段对环境的影响潜值。

(3) 通过对回收利用阶段的正负收益计算分析可以看出, 由于材料回收利用降低了绝大多数原材料生产阶段的环境影响潜值, 从而有效降低了对生态环境的影响。因此材料回收再利用是减少各种排放物的重要途径, 通过材料循环回炉省去了大部分原材料开采、冶炼等诸多环节。本文结论仅仅是在当前中国材料回收利用水平比较低的边界条件下得出的结论, 若能提高对各种材料的回收利用水平, 尤其是加强对一些非金属材料的循环利用, 将更加有效改进其环境属性。

(4) 高效内燃机技术、轻量化、材料回收利用、再制造等绿色发展方向是未来发动机节能减排的重要手

段。若在当前生命周期评价的基础上, 进一步引入再制造, 形成减量化、再制造、再使用、再利用的 4R 循环体系, 将更加有助于挖掘出来发动机的节能减排潜力。

#### [参考文献]

- [1] Reppe P, G Keoleian. Life cycle assessment of a transmission case: magnesium vs. aluminum[J]. International Congress and Exposition Detroit, SAE, 1998.
- [2] Dlamini N G, Fujimura K, Yamasue E, et al. The environmental LCA of steel VS HDPE car fuel tanks with varied pollution control [J]. The International Journal of Life Cycle Assessment, 2011(16): 410-419.
- [3] Dubreuil A, Bushi L, Das S, et al. A comparative life cycle assessment of magnesium front end autoparts[J]. SAE International, 2010, 2010-01-0275.
- [4] 李娟, 杨沿平, 陈轶嵩. 铝合金与铸铁缸盖的生命周期评价对比分析[J]. 环境工程学报, 2015(11): 5642-5648.  
Li Juan, Yang Yanping, Chen Yisong. Comparative analysis on life cycle assessment between aluminum alloy and cast iron cylinder cover[J]. Journal of Environmental Engineering, 2015(11): 5642-5648.(in Chinese)
- [5] 彭飞, 杨沿平, 殷仁述, 等. 商用车铝合金与钢制轮辋生命周期环境影响评价对比分析[J]. 环境科学学报, 2015(12): 4136-4142.  
Peng Fei, Yang Yanping, Yin Renshu, et al. Comparative analysis on life cycle environmental impacts assessment between aluminum alloy and steel rim of vehicle[J]. Journal of Environmental Engineering, 2015(12): 4136-4142.(in Chinese)
- [6] Muoz I, Rieradevall J, Domnech X, et al. Using LCA to assess eco-design in the automotive sector: a case study of a polyolefinic door panel[J]. The International Journal of Life Cycle Assessment, 2005(11): 323-334.
- [7] Duval D, Maclean H L. The role of product information in automotive plastics recycling: a financial and life cycle assessment[J]. Journal of Cleaner Production, 2007(15): 1158-1168.
- [8] Ribeiro C, J V Ferreira, P Partidário. Life cycle assessment of a multi-material car component [J]. The International Journal of Life Cycle Assessment, 2006, 12(5): 336-345.
- [9] Renshu Yin, Yisong Chen, Yanping Yang, et al. An eco-efficiency assessment model and system for automotive products in China[J]. The Journal of Sustainable Mobility, 2015, 2(1): 41-53.
- [10] Chen Yisong, Yang Yanping, Li Xiang, et al. Life cycle resource consumption of automotive power seats[J]. International Journal of Environmental Studies, 2014, 71(4): 449-462.
- [11] 涂小岳, 杨沿平, 徐健全, 等. LNG 重型商用车和柴油重型

- 商用车全生命周期环境排放差异评价[J]. 中国机械工程, 2013, 24(11): 1525-1530.
- Tu Xiaoyue, Yang Yanping, Xu Jianquan, et al. Evaluation of difference between LNG and diesel heavy-duty commercial vehicle's life cycle environmental emission[J]. China Mechanical Engineering, 2013, 24(11): 1525-1530.(in Chinese)
- [12] 涂小岳, 徐建全, 陈轶嵩, 等. 液化天然气商用车与柴油商用车生命周期能耗差异评价[J]. 中国机械工程, 2013(23): 3211-3215.
- Tu Xiaoyue, Xu Jianquan, Chen Yisong, et al. An evaluation of difference between the LNG and diesel commercial vehicle's life cycle energy consumption[J]. China Mechanical Engineering, 2013, 24(23): 3211-3215.(in Chinese)
- [13] 刘夏璐, 王洪涛, 陈建, 等. 中国生命周期参考数据库的建立方法与基础模型[J]. 环境科学学报, 2010, 30(10): 2136-2144.
- Liu Xialu, Wang Hongtao, Chen Jian, et al. Method and basic model for development of Chinese reference life cycle database[J]. Journal of Environmental Science, 2010, 30(10): 2136-2144.(in Chinese)
- [14] 黄娜, 王洪涛, 范辞冬, 等. 基于不确定度和敏感度分析的 LCA 数据质量评估与控制方法[J]. 环境科学学报, 2012, 32(6): 1529-1536.
- Huang Na, Wang Hongtao, Fan Cidong, et al. LCA data quality assessment and control based on uncertainty and sensitivity analysis [J]. Journal of Environmental Science, 2012, 32(6): 1529-1536.(in Chinese)
- [15] Wang H T, Hou P. A novel weighting method in LCIA and its application in Chinese policy context[J]. Matthias Finkbeiner, Towards Life Cycle Sustainability Management, Berlin: Springer.
- [16] Jeroen B Guinée. Handbook on Life Cycle Assessment: Operational Guide to the ISO Standards[M]. Berlin: Springer, 2002, 156.
- (上接第 177 页)
- [12] GB 15618-2008, 中华人民共和国土壤环境质量标准(修订)[S].
- GB 15618-2008, Environmental Quality Standard for Soils (Amended)[S].(in Chinese)
- [13] 闫宝环, 李凯荣, 时亚坤. 铜川市三里洞煤矸石堆积地风化土壤重金属污染及植物富集特征[J]. 水土保持通报, 2012, 32(3): 47-50, 122.
- Yan Baohuan, Li Kairong, Shi Yakun. Heavy metal contamination of weathered soil and enrichment characteristics of plants at Sanlidong coal gangue site in Tongchuan City[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2012, 32(3): 47-50, 122.(in Chinese)
- [14] 周启星, 宋玉芳. 污染土壤修复原理与方法[M]. 北京: 科学出版社, 2004.
- Zhou Qixing, Song Yufang. Remediation of Contaminated Soils: Principles and Methods[M]. Beijing: Science Press, 2004.(in Chinese)
- [15] 叶文玲, 陈增, 徐晓燕. 铜陵铜尾矿库优势植物对重金属富集特征研究[J]. 环境科学与技术, 2015, 38(5): 11-14.
- Ye Wenling, Chen Zeng, Xu Xiaoyan. Heavy metal contents and enrichment characteristics of dominant plants in copper mine tailings in Tongling of Anhui Province[J]. Environmental Science & Technology, 2015, 38(5): 11-14.(in Chinese)
- [16] Liu D, Li S, Islam E, et al. Lead accumulation and tolerance of Moso bamboo (*Phyllostachys pubescens*) seedlings: applications of phytoremediation[J]. Journal of Zhejiang University Science B, 2015, 16(2): 123-130.