

基于 CALCA 的汽车白车身生命周期分析

赵明楠 孙 铨 严玉廷

(中国汽车技术研究中心 ,天津 300300)

摘要 本文通过生命周期分析方法、碳足迹分析,应用 CALCA 工具以及 CALCD 数据库,建立白车身产品生产案例,分析汽车产品生命周期生产过程的能源、材料消耗以及污染排放等环境影响;根据汽车企业典型生产工艺,分析研究不同清单数据采集模式,并提出生命周期清单数据理论评估方法。研究旨在通过实践调研经验,建立一套针对汽车企业的清单数据评估方法理论,指导企业通过多种途径优化汽车产品生产的能耗与排放。

关键词 生命周期评价,清单数据评估,白车身

中图分类号 X384

文献标识码 A

文章编号 1002-2104(2017)05增-0181-05

近年来,中国汽车产业开始飞速发展,汽车产销量一直保持着较高的增长率。2016年汽车产销分别完成2 811.9万辆和2 802.8万辆,比上年同期分别增长14.5%和13.7%,已连续八年蝉联全球第一^[1]。如今,中国已成为名副其实的汽车生产大国与消费大国,汽车生产能耗激增与环境污染排放成为了当今社会发展不可避免的话题。与此同时,政府也在积极应对此发展状况,并越来越关注汽车在其全生命周期产生中的环境影响。2014年7月,工信部发布了《关于组织开展工业产品生态设计示范企业创建工作的通知》^[2],引导工业污染防治从“末端治理”向“全生命周期控制”转变。2015年5月,国务院正式印发《中国制造2025》^[3],提出强化产品全生命周期绿色管理,努力构建高效、清洁、低碳、循环的绿色制造体系。工信部又于2016年6月发布了《工业绿色发展规划(2016~2020)》^[4],将绿色制造工艺发展列入主要规程。2016年12月,国务院办公厅发布了《关于建立统一的绿色产品标准、认证、标识体系的意见》^[5],将生命周期理念贯穿于绿色产品认证过程。在此之前,欧盟委员会早就于2013年4月期间,发布了基于生命周期评价方法的产品环境足迹(Product Environmental Footprint, PEF)方法,此法成为未来欧盟市场统一的绿色零部件产品评价方法。

国际标准化组织将生命周期评价(Life Cycle Assessment, LCA)定义为对一个产品系统的生命周期中输入、输出及其潜在环境影响的汇编和评价(ISO 14040: 2006)^[6],ISO 14040将LCA技术框架定义为4个阶段,其中清单分析阶段所涉及的

生命周期清单(Life Cycle Inventory, LCI)数据收集和评估最为耗时^[7]并且没有一个较为统一的理论实践方法,在很大程度上限制了汽车产品相关的企业调研数据质量,以及后续的汽车产品生命周期环境影响评价分析。

综上所述,大量企业寻求产品节能减排、绿色发展的同时,也需要一套系统的产品分析方法与工具。中国汽车技术研究中心多年与企业合作,总结实践经验,开发出面向汽车产品的CALCA工具与CALCD数据库,结合LCA方法理论体系,为解决企业产品能耗评估、节能设计改良提供相应技术支持。

1 研究方法与模型

本文研究根据国内某大型整车企业实际调研,及汽车生产制造工程师的探讨,将汽车白车身作为研究对象。应用生命周期评价分析方法,分析白车身冲压和白车身焊装等生产过程^[8]。研究范围从产品生命周期的“摇篮”到“大门”,不包括产品的使用与废气处理阶段。

1.1 目标范围与边界

案例主要涉及白车身生产工艺,从白车身冲压工序至白车身产品。研究功能单位为单件白车身产品,产品质量450kg。具体白车身生产工艺流程和系统边界如图1所示,图中资源能耗数量均统一至功能单位。钢板经过冲压工序后直接送至焊装车间,焊装过程排放少量烟尘、一氧化碳和氮氧化物气体。研究旨在说明分析方法,对模型进行了一定的简化,因此不涉及钢铁材料等原材料的回收以

收稿日期: 2017-05-04

作者简介: 赵明楠, 硕士, 工程师, 主要研究方向为汽车成本分析、汽车产品绿色设计、汽车绿色供应链与汽车绿色工厂建设。E-mail: zhaomingnan@catarc.ac.cn。

及少数辅助材料的生产过程。

1.2 研究方法与数据库

本研究应用生命周期评价方法,依据 ISO 14040 和 ISO 14044 等国际标准^[9]的相关规定,使用标准 LCA 的技术框架包括目的及范围的确定、清单分析、影响评价,以及结果解释。原材料和能源的生命周期背景数据主要来自中国汽车技术研究中心(简称“中汽中心”)的中国汽车生命周期数据库(China Automotive Life Cycle Database, CAL-CD),少数辅助型原材料取自 Ecoinvent 3。CALCD 是中汽中心开发的针对中国汽车行业的生命周期数据库,其中包括基础过程和产品生命周期数据、零部件生命周期数据和整车生命周期数据等内容。目前已搭建了整车 5 个系统与 33 个子系统和零部件生命周期模型,涵盖整车总质量的 90% 以上,并积累了 22 821 条汽车相关的生命周期清单过程数据,能够用于分析汽车产品或关键技术性能、成本、环境等方面的生命周期影响。

1.3 生命周期评价工具

案例中选取中汽中心开发的中国汽车生命周期评价(China Automobile Life Cycle Assessment, CALCA)工具进行白车身生命周期分析。该工具系统是为实现比较、计算数据统一、信息化管理而专门开发的全生命周期数据管理与分析平台。该评价工具不同于以往的生命周期评价软件,其开发内容主要面向整车及汽车零部件产品,结合国内能源结构与原材料生产数据清单,更有针对性的分析中国汽车产品全生命周期环境影响。该评价工具主要特点包括:

(1) 通过建立具体的产品模型,模拟原材料生产、交通运输、产品生产等生命周期阶段,分析涉及能源、原材料、辅助性原料等输入,空气、水体、土壤等排放,自动生成高危部件相关生命周期清单。

(2) 对单个物质进行贡献度分析,或同一组装下不同物质及组装数据的对比分析,利用不同的特征化、标准化及权重的方法评估产品的环境影响。

(3) 根据各生命周期阶段自动生成生命周期树图、特征化、归一化结果图以及清单数据表等不同形式的分析报告。

1.4 清单分析

本文研究对象为国内某知名车企,月产销规模为 20 万辆。研究对象为企业主要车型的零配件,生产数据均通过 2015 年实地调研获取。目前,国内没有统一的能耗清单数据采集办法,由企业获得的数据资源有限同时具有很大的不确定性,通过建立规范化的汽车生产模型可以有效提高清单数据采集效率。对于原材料数据,实际生产过程可能涉及原料种类繁多、成分复杂,很多清单项目对最终的评价结果影响很小,可根据 LCA 中的 Cut-Off 准则,按质量忽略重量不到总产品质量千分之一的项目来简化清单采集过程。案例研究中生产阶段输入的原材料主要为钢铁,辅助材料涵盖润滑油、氩气、液态二氧化碳等,能源采用外购电力。其中钢铁 450kg,电力 96kWh,液态二氧化碳 $1.70E-03m^3$ 。白车身生产阶段所输出的气体污染物主要包括烟尘、一氧化碳和氮氧化物等。

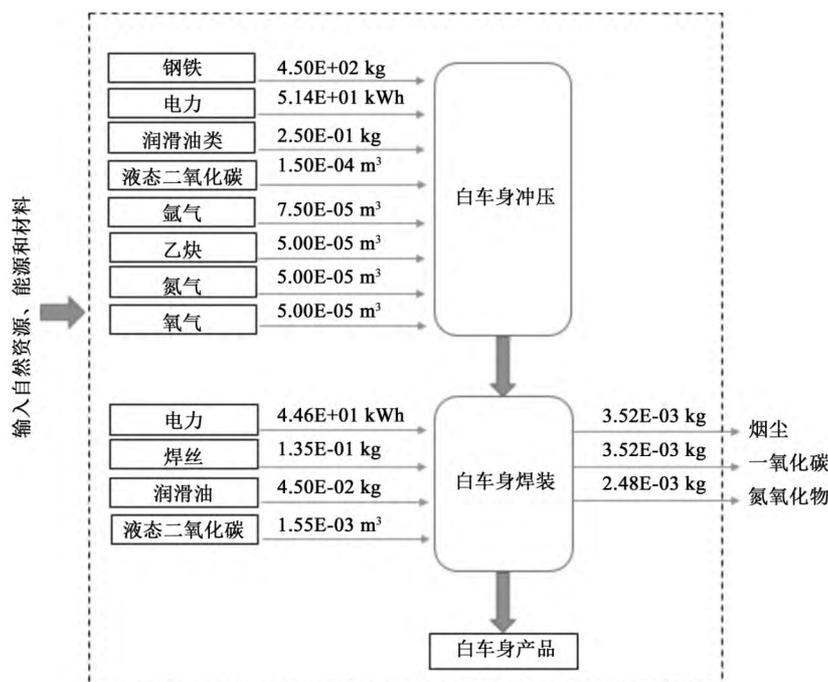


图 1 白车身工艺流程和系统边界图

1.4.1 冲压工序

研究案例中白车身的冲压均为一模两件三序,单次生产产出两件白车身产品,需将能耗数据减少一半。研究的冲压件主要包括:左右侧围、翼子板、顶棚、四侧门内外板、行李箱内外板、发动机罩内外板以及底板等,具体信息如表 1 所示。关于能耗数据,主要消耗能源为外购电力,每个冲压件都需要数次冲压成型,并且同一生产线常常产出多种产品,因此实际生产模式复杂不利于清单数据调研。为解决实际生产与理论计算之间的矛盾,需要明确有效数据资源与理论能耗之间的关系。

案例中汽车生产的冲压工序能耗 E_x ,通过冲压机月生产总能耗 E_i 、白车身产品月生产台数 A_i 计算得出(其中统计年生产能耗时 $n=12$),具体计算方法如公式(1)所示。

$$E_x = \frac{\sum_{i=1}^n E_i}{n} \quad (1)$$

此外,当冲压生产线同时生产多件产品时,无法通过整条生产线情况了解单一产品能耗。数据采集可通过单件产品生产节拍次数 n_x 、每小时该设备能耗功率 W 与生产节拍总次数 n ,估算单件产品耗能 E_x ,具体如公式(2)所示。

$$E_x = W \frac{n_x}{n} \quad (2)$$

1.4.2 焊装工序

关于白车身焊装数据的采集,可以选取能耗较大设备进行估算。案例中涉及的主要焊装设备包括:自动涂胶系统、手动涂胶系统、ABB 机器人、KUKA 机器人、机器人焊钳(气动)、手动一体式焊钳、折边机、预折边机、手动 CO₂ 焊机设备、螺柱焊机、分体式焊钳、脉冲式粉尘除尘器、固

表 1 白车身冲压件及数量

冲压件	零件数	冲压件	零件数
右侧围	1	翼子板	1
左侧围	1	顶棚	1
门外板	1	前门内板	1
左门外板	1	后门内板	1
行李箱外上板	1	发动机罩外板	1
行李箱内板		发动机罩内板	
行李箱外下板	1	后侧围内板	1
前底板	1	后底板	1

定自动焊钳(气动)等。白车身焊装主要设备类型参数信息如表 2 所示。

依据表 2 数据,首先需统计同类型设备每小时总能耗 $P_{\text{总}}$ 。如公式(3)所示,其中 N 为同类型焊装设备数量; W 为该设备功率; Q 为功率因数。功率因数代表能耗效率,需要根据实际生产情况而定。

$$P_{\text{总}} = N \times W \times Q \quad (3)$$

其次需要确定单位时间内该产品的运行占比 A 。公式(4)中 T 为单台产品生产时长,为方便数据统计,该处统计时间单位多以秒计。

$$A = \frac{T}{3600} \quad (4)$$

最后,单台白车身产品焊装过程总能耗 E_x 如公式(5)所示,将全部焊装所涉及的总能耗 $P_{\text{总}}$ 与各自运行占比相乘并求和。

$$E_x = \sum P_{\text{总}} \cdot A \quad (5)$$

1.5 影响评价方法

本研究采用莱顿大学环境科学中心开发的 CML2001 评价方法,产品的环境影响类别包括酸化潜势(AP)、富营养化潜势(EP)、全球增温潜势(GWP 100a)、人体健康损害(HT)和光化学氧化剂生产潜势(POCP)等五个方面,所评价的环境影响类别及相应指标和单位如表 3 所示。特征化过程得到了每种环境影响类型的环境负荷值,但它们表示的仅是绝对总量。利用表 4 中确定的归一化基准值,得到环境负荷的相对大小,这样就可以在不同环境影响类型之间进行比较。

表 2 部分白车身焊装设备相关参数

设备类型	数量	功率/kw	功率因数	单台工作时间/s
自动涂胶系统	25	6	1	20
手动涂胶系统	26	6	1	20
ABB 机器人	66	5	0.6	50
KUKA 机器人	40	5	0.6	50
机器人焊钳(气动)	75	48	0.6	12
手动一体式焊钳	352	42	0.6	10
折边机	13	11	0.8	120
预折边机	4	11	0.8	120
手动 CO ₂ 焊机设备	13	16.2	0.5	20
螺柱焊机	19	55	0.5	20
分体式焊钳	2	56	0.7	20
脉冲式粉尘除尘器	4	11	0.8	120
固定自动焊钳(气动)	6	48	0.6	12

表3 环境影响类别指标和单位

环境影响类型	环境影响指标	环境影响指标英文名称	单位
酸化	酸化潜势	AP	kg SO ₂ e
富营养化	富营养化潜势	EP	kg PO ₄ ³⁻ e
全球变暖	全球增温潜势	GWP 100a	kg CO ₂ e
人体损害	人体健康损害潜势	HT	kg 1 A-DB e
光化学氧化剂生成	光化学氧化剂生成潜势	POCP	kgC ₂ H ₄ e

表4 世界范围内归一化基准值

环境影响类型	单位	归一化基准值
酸化(AP)	kg SO ₂ 当量	2.99E+11
富营养化(EP)	kg PO ₄ ³⁻ 当量	1.29E+11
全球变暖(GWP 100a)	kg CO ₂ 当量	3.86E+13
人体损害(HT)	kg 1 A-DB 当量	4.98E+13
光化学氧化剂生成(POCP)	kgC ₂ H ₄ 当量	4.55E+10

2 研究结果及解释

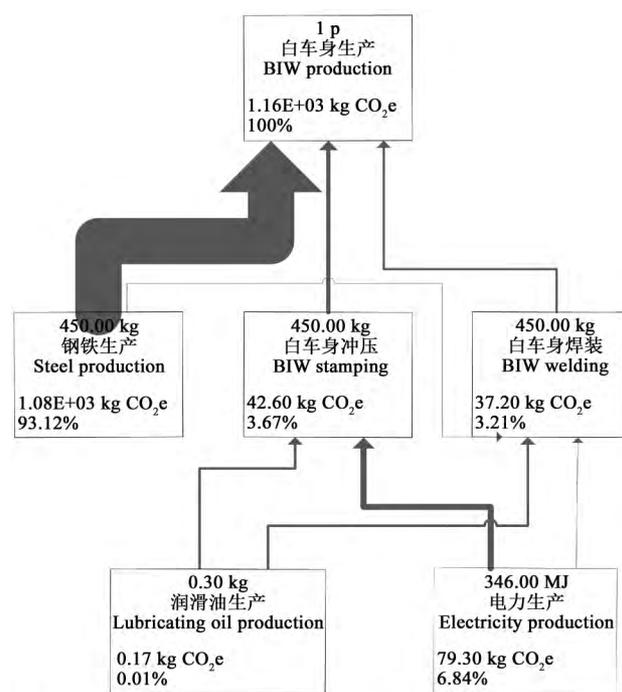
单件白车身产品的全生命周期各项环境影响指标归一化结果,其中 GWP100a 为 1.16E+03kgCO₂e, AP 为 6.82E+00kgSO₂e, POCP 为 2.56E-01kgC₂H₄e, EP 为 4.17E-01kgPO₄³⁻e, HT 为 1.81E+02kg1 A-DB e。环境影响归一化结果最为突出的是 GWP 与 AP 两项, POCP、EP 以及 HT 影响相对较少。

研究为进一步分析白车身生产各阶段的 GWP 贡献情况,将案例进行碳足迹分析。分析表明,白车身生产阶段的碳足迹为 1.16E+03kgCO₂e,如图 3 所示,钢铁生产过程的碳足迹最大,为 1.08E+03kgCO₂e,贡献了白车身生产阶段碳足迹的 93%;白车身冲压过程和白车身焊装过程的碳足迹大小接近,分别为 42.60kg CO₂e 和 37.20kg CO₂e,并贡献了白车身生产阶段碳足迹的 3.67%和 3.21%。

研究发现,白车身的冲压与焊装过程涉及的废气排放量较少,主要来自于能源生产的间接排放,电力的使用对生产工艺碳足迹影响最为明显。案例中手动一体式焊钳与机器人焊钳(气动)耗能相对较高,同时其节能减排潜力也相对较大。原材料消耗以钢铁为主,采用低能耗的轻质合金钢材,提高冲压过程的钢材利用效率可以很大程度上的减少该阶段的碳足迹以及各项环境影响指标。

3 结论

随着汽车产品生命周期评价研究的不断发展,建立适



注:裁剪比例0.01%,碳足迹小于0.01%的过程未显示

图3 白车身产品生产碳足迹

合企业的能耗数据采集模式,可以很大程度上简化企业数据采集的耗费时间,同时对汽车产品 LCA 分析也具有积极意义。针对白车身案例,本文给出了企业生产汽车零部件清单数据评估的一般方法,该方法适用于汽车企业环境管理、汽车产品的设计和研发、降低企业能耗以及产品绿色生态设计。此外,本文进行了白车身生产的环境影响生命周期分析以及碳足迹分析,发现原材料的使用与电力的消耗是改变产品生产能耗排放模式的关键因素。降低高能耗过程的电力消耗与高效利钢铁材料生产是减少白车身生命周期环境影响的主要方式。研究案例为支持中国汽车产品绿色发展道路,以及帮助政府制定环境管理政策和法规。

参考文献

[1] 中国汽车工业协会. (2017-01-12) [2017-03-21]. <http://www.>



- caam.org.cn/xiehuidongtai/20170112/1505203997.html. 2016 年汽车工业经济运行情况 [EB/OL].
- [2] 中华人民共和国工业和信息化部. 工业和信息化部关于组织开展工业产品生态设计示范企业创建工作德通知 [EB/OL]. (2014-07-14).
- [3] 国务院. 国务院关于印发《中国制造 2025》的通知 [EB/OL]. (2015-05-19) [2017-03-21]. <http://www.gov.cn/zhengce/content/2015-05/19/content-9784.htm>.
- [4] 工信部. 绿色发展规划(2016-2020) [EB/OL]. (2016-07-18) [2017-04-01]. <http://www.miit.gov.cn/n146295/n165285/n16529301/n3757016/c5143553/content.html>.
- [5] 国务院. 国务院办公厅关于建立统一的绿色产品标准、认证、标识体系的意见 [EB/OL]. (2016-12-07) [2017-04-01]. <http://www.gov.cn/n146295/n165285/n1652930/n3757016/c5143553/content.html>.
- [6] ISO. ISO 14040: 2006 Environmental management—life cycle assessment—principles and framework [S]. Geneva: International Organization for Standardization 2006.
- [7] 于随然, 陶璟. 产品全生命周期设计与评价 [J]. 科学出版社, 2012.
- [8] 王若岩, 李成灿. 尺寸工程在白车身制造过程中的应用研究 [J]. 中小企业管理与科技 2016.
- [9] ISO. ISO 14044: 2006 Environmental management—life cycle assessment—requirements and guidelines [S]. Geneva: International Organization for Standardization 2006.

Life cycle analysis of vehicle body-in-white based on CALCA

ZHAO Ming-nan SUN Xin YAN Yu-ting

(Chinese Automotive Technology & Research Centre ,Tianjin 300300 ,China)

Abstract This paper takes the body-in-white as an example ,based on life cycle analysis method ,carbon footprint analysis ,CALCA tool and CALCD database ,and analyzes energy ,raw material consumption and greenhouse gas emissions in the production process of automobile product life cycle. According to the typical production process of automobile firms it studies the different kinds of data collection process ,and puts forward the theory of life cycle inventory data evaluation method. The research establishes a set of data evaluation method for automobile firms ,to guide firms to optimize the energy consumption and emission of automobile production.

Key words life cycle assessment; data evaluation; body-in-white