

生命周期评估法在涂装车间的应用

王思澄, 刘苏敏, 仇佳俊, 王天然

(北京奔驰汽车有限公司, 北京 100176)

摘要: 介绍了生命周期评估法, 并应用在整车制造过程中能源消耗与环境排放最为显著的涂装工艺, 追踪其生产过程中的碳足迹, 为汽车涂装行业定量化评估其全生命周期生产活动中主要能源的使用及其产生的二氧化碳排放对生态环境的影响, 进而为评价涂装生产过程中的环境改善提供了一个全新的方法论和实际案例。

关键词: 生命周期评估; 涂装工艺; 碳足迹

中图分类号: TQ639

文献标志码: B

文章编号: 1007-9548(2023)06-0064-05

Application of Life Cycle Assessment in Painting Workshop

WANG Si-cheng, LIU Su-min, QIU Jia-jun, WANG Da-ran

(Beijing Benz Automotive Co., Ltd., Beijing 100176, China)

Abstract: The LCA method was introduced, and the carbon footprint of the painting process was tracked by applying LCA into it, where energy consumption and environmental emissions were most significant during the entire vehicle production process. The impact of significant energy use as well as generated carbon dioxide emission on the ecological environment during the whole life cycle production activities of automotive painting industry were quantitatively evaluated, and a new methodology and practical case for the evaluation of environmental improvement opportunities were also provided.

Key words: life cycle assessment; painting process; carbon footprint

0 引言

汽车涂装工艺是指将涂料覆盖在经过处理的白车身表面, 经烘烤干燥成膜, 从而对车身起到腐蚀防护、装饰美观等作用的工艺。整车涂装工艺通常包含前处理电泳、密封胶、面漆、注蜡四大主工序和若干道子工序。由于自身工艺流程和生产环境的要求, 导致涂装工艺成为整车制造四大工艺中资源和能源消耗以及环境排放最为显著的工艺, 因而针对涂装生产过程中对资源和环境的影响进行定量化的评估, 进而有的放矢进行节能减排, 对于实现整车制造的绿色与可持续发展具有重要意义。

在 ISO 14001 以及 ISO 50001 的框架下, 积极建

立环境管理体系和能源管理体系, 推行清洁生产, 在生产制造过程的整个生命周期中减少能源消耗与环境污染已成为当今企业的重中之重。随着人们环保意识的不断增强, 针对产品生产和使用过程中对环境可能造成的影响, 一款有力的可持续发展支持工具——生命周期评估(LCA)被开发了出来。生命周期评估法, 也称为生命周期分析法, 是一种评估环境影响的标准化方法, 其可量化评估贯穿产品或过程全生命周期的潜在环境影响(例如资源的使用和排放)。目前国内企业界对整车制造尤其是涂装工艺的生命周期评估研究较为不足, 且大多停留在理论及概念层面, 缺乏贴合实际生产情况的应用。本文以某汽车涂装车间为例, 通过对整车制造四大工艺中能源消耗及环境影响最为显著的涂装工艺进行生命周期评估的应用, 追踪其生产过程中两大主要能源——电和天然气消耗产生的碳足迹, 定量化评估其全生命周期制造过程中主要能源使用对环境产生的影响, 从而可以为针对性的节能减排措施的

收稿日期: 2023-02-13

作者简介: 王思澄(1994—), 男, 硕士, 工程师, 主要从事涂装车间的质量管理体系、环保管理体系与能源管理体系工作。E-mail: wangsch01@bbac.com.cn。

实施提供指导,也为涂装行业的绿色低碳发展提供一个技术案例与全新思路。

1 生命周期评估

在 ISO 14040 标准中,生命周期评估被定义为:生命周期评估研究从原材料获取到生产,使用和废弃的整个产品生命周期(即从摇篮到坟墓)的环境因素和潜在影响。需要考虑的环境影响类别通常包括资源利用、人类健康和生态后果。在 ISO 14040 和 ISO 14044 中描述了生命周期评估的 4 个主要阶段:目标与范围定义、清单分析、影响评估、解释说明(见图 1)。

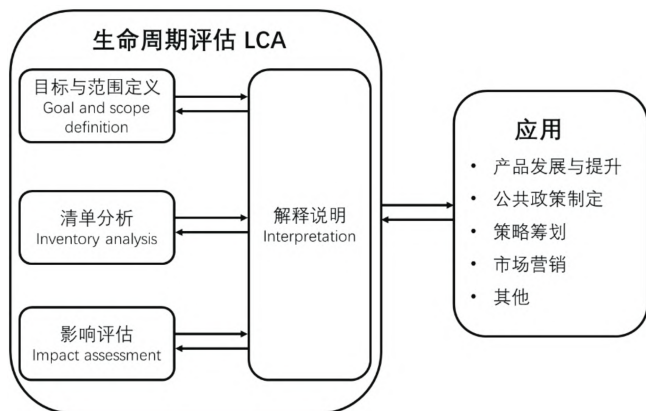


图 1 生命周期评估主要阶段

生命周期评估的第一步是目标与范围定义,在第二步生命周期清单分析中,建立过程中所有相关的质量流和能量流,并且所有物质和能量的输入和输出都将被列入清单中^[1]。然后根据从生命周期清单分析中获得的结果进行生命周期影响评估。在生命周期影响评估阶段,输入和输出会根据其对环境的影响而进行分类和计算。在最后一步中评估和解释结果,确定对人类健康、环境和自然资源的影响。图 1 中的双向箭头意味着 LCA 研究是基于先前的分析结果不断检查和确定研究的目标是否实现的迭代过程,若评估表明无法实现时需要修改目标和范围,因此 LCA 并不是单向的过程。

1.1 目标与范围定义

根据 ISO 14040,目标与范围的定义必须作为标准 LCA 研究的第一步。在 ISO 14044 中它被定义为:LCA 的目标和范围应明确界定,并应与预期的应用相一致。由于 LCA 是一个迭代过程,在研究期间需要不断完善范围的界定。目标是由进行 LCA 研究的组织进行定义的,通常向公众提供对应用范围、利益实现、目标群体等方面的解释^[2]。在范围定义中描述了产品系统、功能单元和系统边界。功能单元定义了产品已识别

功能(性能特征)的量化,而系统边界定义了要包含在系统中的单元过程,它们的定义都是为了简化不同复杂流程或服务之间的比较。ISO 建议的取舍规则(cut-off 规则)适用于整个产品系统以及和质量、能源、环境相关的单个单元过程。它是以环境影响的大小决定该单元过程是否可以忽略,通常规定小于 1% 时可以忽略,但总共忽略的部分不应超过 5%。

1.2 清单分析

根据 ISO 14040,生命周期清单分析被定义为:生命周期评估中涉及产品整个生命周期的投入和产出的汇总和量化的阶段。作为基于简化(线性)系统的物质和能量分析,生命周期清单考虑了与产品相关的所有环境输入和输出,包括原料和能量的输入,以及污染物和所有废物流的排放。在定义单元过程之后,必须对过程进行量化,而后包含所有原始数据和中间结果的表格将会呈现清单分析的结果。这里需要重点说明的是,目标和范围定义中包含的所有功能单元、系统边界等都不能缺失。最后,确定生命周期清单的结果,然后用于接下来的生命周期影响评估。

1.3 影响评估

根据 ISO 14040,生命周期影响评估被定义为:生命周期评估中旨在了解和评估产品系统在产品的整个生命周期中潜在环境影响的程度和重要性的阶段。一般来说,生命周期影响评估的流程包括将清单数据与特定环境影响类别及类别指标相关联,以量化这些影响。此外,生命周期解释说明阶段所需的信息也可以由生命周期影响评估阶段提供。值得注意的是,影响评估中可能会包含迭代过程,以确认 LCA 研究的目标是否已实现,或者在评估显示无法实现时修改目标和范围。生命周期影响评估可以通过将产品生命周期中大量具有不同环境相关性的资源提取和物质排放转化为有限数量的环境影响评分,以便于接下来的生命周期解释说明阶段^[3]。这可以通过表征因子来实现,包括中点(问题导向)指标和终点(损害导向)指标。本文应用 ReCiPe2016 影响评估法,将生命周期清单数据转化为统一的表征因子,此方法总共包含 18 个中点指标和 3 个终点指标^[4]。

影响类别和表征因子的选择取决于研究的焦点。由于本文主要聚焦于追踪涂装车间生产过程中主要能源使用产生的碳足迹,故中点影响类别仅选择了气候变化(climate change)一项,目的是研究涂装车间生产过程中不同能源类型以及不同过程工艺间碳排放产生的环境影响的对比。

气候变化(也称全球变暖,global warming)这一影响类别的主要影响途径为:温室气体(greenhouse gas,

GHG)排放将增加大气中温室气体的浓度,进而增强辐射强迫能力,导致全球平均温度升高,最终会对人类健康以及陆地和淡水生态系统造成损害^[4]。由于在大多数 LCA 研究中,CO₂ 是导致全球变暖最重要的温室气体,因此通常用全球变暖潜能值(global warming potential,GWP)计算其他温室气体(如甲烷、一氧化二氮、六氟化硫、氯氟烃等)排放影响的相对值。GWP 表示与释放 1 kg 其他温室气体产生相同影响的 CO₂ 质量,其单位为千克二氧化碳当量(kg CO₂-eq.)。然而,由于各种温室气体产生影响的寿命不同,因此需要一个时间范围来计算有效期,这个范围通常选择 100 年(表示为 GWP₁₀₀)^[1],一些主要温室气体的 GWP₁₀₀ 如表 1 所列。

表 1 主要温室气体的全球变暖潜能值(GWP₁₀₀)

温室气体化学名称	GWP ₁₀₀ / (kg CO ₂ -eq.)
二氧化碳 (CO ₂)	1
甲烷 (CH ₄),可再生	23
甲烷(CH ₄),化石	25
一氧化二氮 (N ₂ O)	298
四氟甲烷 (CF ₄)	7 390
三氟化氮 (NF ₃)	17 200
六氟化硫 (SF ₆)	22 800

1.4 解释说明

作为生命周期评估的最后一个阶段,解释说明总结了从清单分析和影响评估中得出的结果,并根据研究目标提出建议。换句话说,它展示了进行这项研究的原因。根据 ISO 14040,其被定义为:生命周期评估的解释说明阶段将清单分析和影响评估的结果一并考虑,该阶段应提供与既定目标和范围一致的结果,并得出结论,解释局限性和提供建议。同时,根据 ISO

14044^[5],解释说明阶段应包含以下步骤:1)根据生命周期清单分析和影响评估阶段的结果识别出重要的问题;2)完整性、敏感性和一致性检查的评估;3)结论、局限性和建议。

评估这些结果的另一种方法是敏感性分析,其可评价由于数据质量、取舍规则和影响类别的选择等引起的 LCA 结果的不确定性。此外,在解释说明阶段可能需要迭代过程来检查 LCA 研究的目标和范围是否得到满足。

2 涂装车间的生命周期评估

2.1 目标与范围定义

文中生命周期评估研究的目标是,通过分别追踪某涂装车间生产过程中两大主要能源——电和天然气的使用,以及涂装生产各主要过程和单元(前处理电泳、密封胶、面漆、注蜡、公用动力)的电和天然气的使用,在涂装车身全生命周期生产过程中产生的碳足迹,并分别进行对比,定量化评估该涂装车间的主要能源使用对环境产生的影响。此外在生命周期解释说明阶段的敏感性分析中还会对比评估该涂装车间整体生产过程中使用不同电力来源造成的环境影响的差异。

文中涂装车间生产过程被分解成一系列连续的需要能源输入的单一过程,其流程如图 2 所示。图中所示的 LCA 边界内的所有对象,包括每个单一过程中主要能源(电和天然气)的消耗以及 CO₂ 的产生和排放都被纳入本 LCA 研究的范围。由于本文仅研究涂装车间生产过程中主要能源的使用产生的碳足迹对环境产生的影响,故生产过程中的物质输入与输出(原辅料的使用及其产生的废弃物的排放和处理)不纳入研究范围之列。另外根据取舍规则,主要能源之外的次要能源消耗(如蒸气、热能、压缩空气等)及其产生的碳排放,由于相对主要能源来说对环境的影响较小,可忽略不计,故不纳入本 LCA 研究的范围。

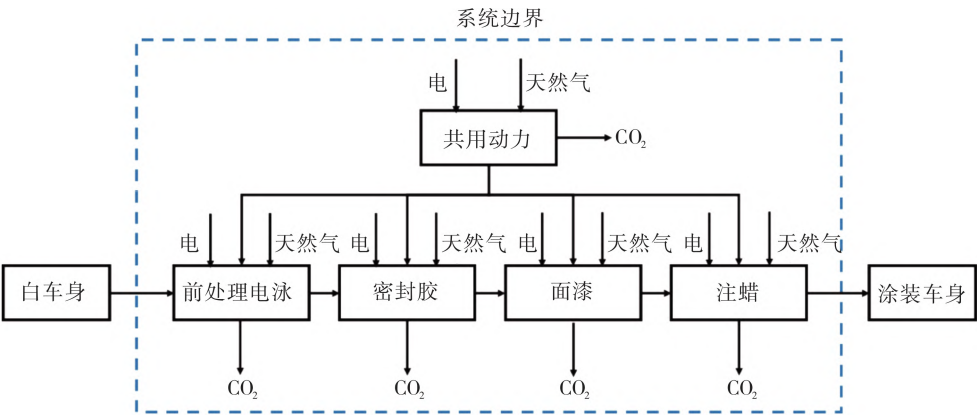


图 2 涂装车间生产过程 LCA 范围及边界

由于目前还没有可供涂装生产过程直接利用的 LCA 研究数据,并且本文的重点在于涂装车身生产制造过程的 LCA 研究,属于整个产业链中的其中一个增值过程,因此本文选择了从门到门(gate-to-gate)的研究方法。离开 LCA 系统边界的最终产品是涂装车身,这里选择了一辆涂装车身作为功能单元。

2.2 清单分析

为了将 LCA 研究归一化并作为标准基础,在生命周期清单分析中将一辆涂装车身作为功能单元。在可持续发展研究中,CO₂ 碳的排放通常涵盖两部分,即在企业直接控制的范围内产生的直接排放,如燃气消耗,以及企业外购能源产生的间接排放,如电力消耗。清单分析中所有能耗数据来自实际生产过程中的统计,而 CO₂ 排放则是基于中国产品全生命周期温室气体排放系数库提供的 2020 年中国电网平均碳排放因子(0.581 kg CO₂-eq./kW·h)、天然气碳排放因子(2.16 kg CO₂-eq./Nm³)和太阳能发电碳排放因子(0.09 kg CO₂-eq./kW·h),并结合能源消耗情况计算得来。单台涂装车身在涂装车间全生命周期制造过程中主要能源消耗及 CO₂ 排放,单台涂装车身在涂装生产各主要过程(前处理电泳、密封胶、面漆、注蜡、公用动力)的能源消耗及 CO₂ 排放,以及单台涂装车身在涂装车间全生命周期制造过程中使用来自电网供电和光伏发电所产生的 CO₂ 排放见表 2~4。

表 2 单台涂装车身全生命周期制造过程中能源消耗及 CO₂ 排放

过程	输入		输出	
	能源	值	排放	值/kg
涂装车间	电(电网)	235.7 kW·h	CO ₂	136.94
	天然气	25.5 Nm ³	CO ₂	55.08

表 3 单台涂装车身在涂装生产过程中能源消耗及 CO₂ 碳排放

过程	输入		输出	
	能源	值	排放	值/kg
前处理电泳	电(电网)	40.05 kW·h	CO ₂	23.27
	天然气	3.19 Nm ³	CO ₂	6.89
密封胶	电(电网)	10.64 kW·h	CO ₂	6.18
	天然气	3.25 Nm ³	CO ₂	7.01
面漆	电(电网)	43.16 kW·h	CO ₂	25.08
	天然气	10.94 Nm ³	CO ₂	23.64
注蜡	电(电网)	2.77 kW·h	CO ₂	1.61
	天然气	0.33 Nm ³	CO ₂	0.70
公用动力	电(电网)	139.08 kW·h	CO ₂	80.81
	天然气	7.80 Nm ³	CO ₂	16.84

表 4 单台涂装车身全生命周期制造过程中使用不同电力来源所产生的 CO₂ 排放

过程	输入		输出	
	能源	值/kW·h	排放	值/kg
涂装车间	电(电网)	235.7	CO ₂	136.94
	电(光伏)	235.7	CO ₂	21.21

2.3 影响评估

根据 ReCiPe 方法^[7],使用中点指标和终点指标来评估涂装车间生产过程中对环境产生的影响,这里使用“Hierarchist”(H)模型进行影响评估。中点指标的选择是基于对受 LCA 研究范围内的过程影响最显著的环境类别的评估,由于文中 LCA 研究的目标是基于涂装车间生产过程中的主要能源消耗及其产生的 CO₂ 碳排放追踪其碳足迹,进而评估其对环境产生的影响,所以这里选择的中点指标为气候变化,使用全球变暖潜能值(GWP₁₀₀)来定量化表征其对人类健康和生态环境的损害,这也是 LCA 研究选择的终点指标。根据表 1,1 kg CO₂ 气体的 GWP₁₀₀ 值为 1 kg CO₂-eq.,进而我们可以分别得出单台涂装车身在涂装车间全生命周期制造过程中主要能源消耗产生的环境影响(见表 5),单台涂装车身在涂装生产各主要过程能源消耗产生的环境影响(见表 6),以及单台涂装车身在涂装车间全生命周期制造过程中使用来自电网供电和光伏发电所产生的环境影响(见表 7)。

表 5 单台涂装车身全生命周期制造过程中能源消耗的 GWP₁₀₀ 值

过程	能源	GWP ₁₀₀ /(kg CO ₂ -eq.)
涂装车间	电(电网)	136.94
	天然气	55.08

表 6 单台涂装车身在涂装生产过程中能源消耗的 GWP₁₀₀ 值

过程	能源	GWP ₁₀₀ /(kg CO ₂ -eq.)
前处理电泳	电(电网)	23.27
	天然气	6.89
密封胶	电(电网)	6.18
	天然气	7.01
面漆	电(电网)	25.08
	天然气	23.64
注蜡	电(电网)	1.61
	天然气	0.70
公用动力	电(电网)	80.81
	天然气	16.84

表 7 单台涂装车身制造过程中使用不同电力来源的 GWP₁₀₀ 值

过程	能源	GWP ₁₀₀ /(kg CO ₂ -eq.)
涂装车间	电(电网)	136.94
	电(光伏)	21.21

2.4 解释说明

根据 ISO 14040 定义的规则对 2.2 和 2.3 章节中的数据进行分析,并对影响评估的结果进行解释,其目的是核实清单分析和影响评估的可靠性。此外还进行了敏感性分析,将涂装生产过程中使用来自电网供电和光伏发电所产生的环境影响进行了比较。

2.4.1 涂装生产主要能源消耗产生的环境影响

基于表 5 的数据,单台涂装车身在涂装车间全生命周期制造过程中,电的消耗产生的全球变暖潜能值要远高于天然气。其原因在于发电厂在发电过程中会产生大量的温室气体(如 CO₂、CH₄、N₂O 和 CO)并释放到环境中,且涂装车间生产过程中电的消耗占比相对于天然气来说更大,故其产生的全球变暖潜能值也更高。

2.4.2 涂装生产过程主要能源消耗产生的环境影响

基于表 6 的数据,单台涂装车身在涂装车间制造过程中,电力消耗方面公用动力产生的全球变暖潜能值最高,然后依次是面漆、前处理电泳、密封胶、注蜡;而就天然气消耗来说,面漆产生的全球变暖潜能值最高,然后依次是公用动力、密封胶、前处理电泳、注蜡。此外,公用动力、前处理电泳、面漆以及注蜡过程电的消耗产生的全球变暖潜能值要高于天然气,而密封胶过程天然气的消耗产生的全球变暖潜能值要高于电。其原因在于公用动力(诸如制冷站和供风单元)以及前处理电泳过程本身在生产过程中会消耗大量的电力,其比重要高于天然气;而相比之下面漆过程在消耗大量电力的同时由于有中间烘房和两条面漆烘房,天然气消耗的占比也比较显著;而密封胶和注蜡过程相比之下耗电量不大,其由于各自的烘房产生的天然气消耗的占比就会显著提升,其全球变暖潜能值也相应提升。

2.4.3 涂装生产使用不同电力来源所产生的环境影响

基于表 7 的数据,单台涂装车身在涂装车间全生命周期制造过程中,使用来自电网供电产生的全球变暖潜能值要远高于光伏发电。作为可再生的清洁能源,以太阳能作为能量来源的光伏发电具有特定的优势:一旦安装并投入使用,其运行不会产生污染,也不会产生温室气体排放。这也是在同样耗电量的情况下,光伏发电产生的全球变暖潜能值更低的原因,使用光伏发电产生的电力比电网供电产生的电力更加环保。

3 结语

本文通过生命周期评估法,追踪了整车制造四大工艺中环境影响最为显著的涂装生产过程中电和天然气的消耗产生的碳足迹,利用全球变暖潜能值(GWP₁₀₀)定量化评估了单台涂装车身在涂装车间全生命周期制造过程中主要能源使用对环境产生的影响。从本文的 LCA 研究中可以得出,在涂装生产过程中电力消耗产生的碳排放对环境的影响最为显著;而在涂装生产各主要过程中,由于公用动力、面漆、前处理电泳过程的主要能源消耗量占比较大,因此这 3 个过程产生的碳排放也是涂装生产过程中对环境的影响最为显著的;此外,如果涂装生产过程中使用的电力完全来源于光伏发电,则相比于传统电网供电,其产生的碳排放对环境的影响要显著减少。因此在涂装生产过程中,为减少对环境产生的影响,应主要针对电力消耗进行减量控制,尤其是用电量占比较大的工艺过程;此外还应大力推广可再生能源的广泛使用,其可显著减少电力消耗和其他能源需求过程对环境产生的影响。

目前,以碳达峰和碳中和为核心的双碳目标已经得到了全球范围一致的认可,同时其也已上升至国家战略层面。在目前整车制造业全行业聚焦电动化、智能化、网联化转型的同时,绿色低碳生产车间的建设也同样重要。随着生命周期评估法的广泛应用,更高效、更环保、更经济的生产模式和制造工艺将会被不断发掘与应用,这在技术、经济和社会方面都是有益的。在 LCA 理论的指导下,可以为涂装车间乃至整个汽车制造业针对性的实施节能减排提供指导方向,为全行业的绿色低碳发展提供先进的思想和科学的方法。

参考文献:

[1] Klöpffer W, Grahl B. Life cycle assessment (LCA): a guide to best practice[M].John Wiley & Sons,2014.

[2] Frank C. Guidelines for life-cycle assessment: a ‘code of practice’-from the SETAC workshop held at sesimbra[J]. Society of Environmental Toxicology and Chemistry,Portugal, 1993.

[3] Hauschild M Z, Huijbregts M A J.Introducing life cycle impact assessment[M].Springer,Dordrecht,2015:1-16.

[4] Huijbregts M A J, Steinmann Z J N, Elshout P M F, et al. ReCiPe2016: a harmonised life cycle impact assessment method at midpoint and endpoint level [J]. The International Journal of Life Cycle Assessment,2017,22(2):138-147.

[5] Finkbeiner M, Inaba A, Tan R, et al. The new international standards for life cycle assessment: ISO 14040 and ISO 14044 [J].The International Journal of Life Cycle Assessment,2006,11 (2): 80-85.