

# OEM汽车涂装车间技术的环境生命周期评价(一)

□ C. Jason Pierce, Josh Seeley  
(Eastman Chemical company)

**摘要:** 生命周期评价(LCA)是一种评价产品系统的环境影响和环境权衡的标准化方法。伊士曼化工公司完成了一项“从涂料到成品车涂装”的LCA研究,在该研究中,比较了5种有代表性的OEM汽车涂装车间工艺配置的温室气体(GHG)影响和挥发性有机化合物(VOC)排放性能。涂装车间数据由IHS提供。这些工艺配置包括:1)三涂两烘(3C2B)水性(WB)底色漆和1K罩光清漆;2)3C2B WB底色漆和2K罩光清漆;3)3C2B低固含溶剂型底色漆和1K罩光清漆;4)三涂一烘(3C1B)高固含溶剂型底色漆和1K罩光清漆;5)3C1B WB底色漆和1K罩光清漆。本研究的目标是通过比较通用工艺技术类别来帮助理解差异和制定决策。本研究的结论是,3C1B高固含溶剂型工艺可以实现最低的GHG释放量,同时达到欧洲现行的VOC排放限值35 g/m<sup>2</sup>。但是,如果世界上某些地区的OEM选择不采用VOC减排技术,那么为了达到排放限值35 g/m<sup>2</sup>,需要采用WB技术。这项LCA研究表明,高固含溶剂型技术是对环境影响最小,有利于可持续性发展的技术,建议政策制定者和利益相关者予以考虑。

**关键词:** 生命周期评价; LCA; 涂装车间; 汽车; 温室气体; GHG

**中图分类号:** TQ630.9

**文献标识码:** C

**文章编号:** 1006-2556(2014)10-0022-05

DOI:10.13531/j.cnki.china.coatings.2014.10.005

## Environmental Life Cycle Assessment of OEM Automotive Paint Shop Technologies( I )

C. Jason Pierce, Josh Seeley  
(Eastman Chemical company)

**Abstract:** LCA is a tool well-suited to assessing environmental issues for different paint shop technology options. In this study, Eastman studies LCA from coatings to car body painting. Five representative OEM paint shop technologies which influence GHG and VOC emissions are introduced: 1) 3 coat – 2 bake (3C2B) waterborne(WB) base coat and 1K clear coat; 2) 3C2B WB base coat and 2K clear coat; 3) 3C2B low solventborne base coat and 1K clear coat; 4) 3 coat-1bake(3C1B) high solid content solventborne base coat and 1K clear coat; 5) 3C1B WB base coat and 1K clear coat. Through comparisons and study results, strategies can be made by decision makers. Results show that 3C1B high solid content solventborne technology has lowest GHG emission and satisfied the VOC emission limit value in Europe(35 g/m<sup>2</sup>). In some regions, if VOC abatement technology is not adopted, for reaching VOC emission limit value(35 g/m<sup>2</sup>), WB technology needs to be adopted. Through LCA study, high solid content solventborne technology is proved to be environmentally friendly and it is suggested that regulation makers consider about it.

**Key words:** Life Cycle Assessment, LCA, paint shop, automobile, greenhouse gas, GHG

### 1 概述

#### 1.1 背景

可持续性发展已成为全球关注的焦点之一。尽管其内涵纷繁复杂,不同利益相关者对其理解各不

相同,但大多数人认为可持续性发展是通过加强环境管理、承担社会责任和促进经济增长,为现在和将来创造价值。可持续性发展包括在不同利益之间做出均衡选择,并追求对社区、国家、企业乃至全世界

最有利的解决方案。为达成见解,促进对环境效益、负担和权衡更全面的了解,使用生命周期评价(LCA)等严格的环境评价工具至关重要。生命周期评价方法对于决策者和各级利益相关者大有裨益。

过去30年里,全世界OEM汽车涂装车间在运营监管方面发生了显著变化<sup>[1]</sup>。最初,有关环境问题的争论主要集中在挥发性有机化合物(VOC)的排放及相关的空气质量问题上。许多地区纷纷颁布各种控制VOC排放的法规,而满足性能标准的相关技术却迟迟未能出现。为了符合日益严格的VOC标准,欧洲OEM采用水性(WB)底色漆技术替代传统的低固含量溶剂型(LSSB)技术。为满足地方空气质量法规的要求,各涂装车间设施需要采用诸如蓄热式热氧化法(Regenerative Thermal Oxidation)等VOC减排技术,但需要的程度有所不同。WB底色漆技术已经帮助一些车间设施减少或消除了对减排的需求<sup>[2-3]</sup>。

最近几年,现代涂装车间开始应用紧凑型涂装工艺,包括高固含量溶剂型(HSSB)和WB两种配置。据称,相对于传统的SB和WB工艺,紧凑型涂装工艺可显著降低能耗。

凭借在汽车制造业的巨大增长潜力,中国目前已成为全球关注的焦点。2012年,中国OEM涂装车间的监管情况经历了巨变,这一年中华人民共和国工业和信息化部颁布法规,要求所有新乘用车涂装车间必须采用WB底色漆技术<sup>[4]</sup>。2013年,国家发展和改革委员会探讨了涂装车间的VOC排放限值,借鉴欧洲的规定设定了排放限值,但并不强制达到限值所采取的技术。随着公众对环境问题的关注度越来越高,中国规定的排放限制可能比欧洲现行的排放限值<sup>[5]</sup>35 g VOC/m<sup>2</sup>更为严格。对于涂装车间而言,最突出的环境问题通常是VOC排放(影响当地的烟雾和气味)和能源消耗(影响温室气体的排放,以及能源和水资源等自然资源的消耗)。

LCA工具非常适合评价不同的涂装车间技术对环境造成的影响。根据Ford Motor Company(福特汽车公司)<sup>[6]</sup>、BASF(巴斯夫公司)<sup>[7]</sup>和Durr(德国杜尔公司)最近几年提供的LCA评价结果,发现相对于WB技术,HSSB技术能够满足现代VOC法规的要求并减少能源消耗和温室气体(GHG)的影响。为了更深刻地了解各种涂装工艺对环境的综合影响,同时确认以前的行业研究结果,伊士曼赞助了这项独立的LCA研究项目,该研究比较了5种主要的OEM汽车涂装车间工艺配置对环境的影响。

## 1.2 汽车涂料和涂装车间基础知识

为使不熟悉该行业的读者能够有一个大致的了解,这里先谈谈汽车涂装车间技术的基础知识。

未经涂装的汽车焊接车身,包括车门、引擎盖、甲板或行李箱盖,被称为白车身(BiW)或壳体。BiW没有装配任何内饰、底盘、传动系统组件,而是从焊接车间直接运送到涂装车间,先进行清洗以清除污垢、油污和其他污染物,再进行最终涂装。

传统的汽车涂装包括4层:电泳底漆、中涂漆(又名“二道底漆”)、底色漆和罩光清漆。每个涂层都有特殊用途(如图1所示)并具有独特的配方。例如,底色漆的配方包括溶剂、树脂、流变控制剂、颜料和其他添加剂。溶剂可能包括有机物和/或水。需要注意的是,目前的WB涂料确实含有一些有机溶剂,WB底色漆配方中的溶剂含量通常从10%到16%<sup>[8]</sup>(质量分数)不等。中涂漆和底色漆可以是SB或WB。罩光清漆目前绝大多数是SB,有1K和2K之分。

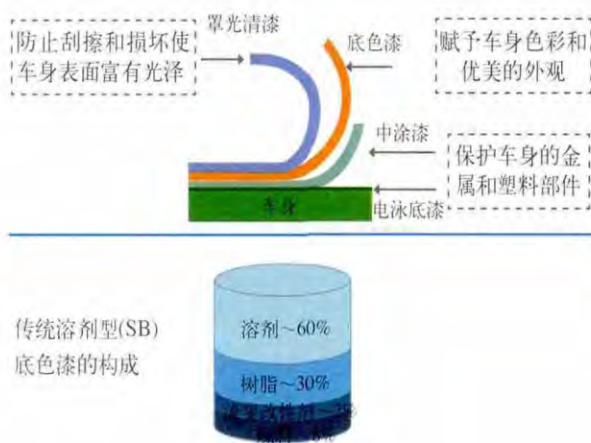


图1 汽车涂料基础知识

Fig. 1 Automotive Paint Basics

本研究中,LSSB是指固含低于30%的SB底色漆,HSSB是指固含量高于40%的SB底色漆,WBBC是指固含量介于18%~24%的WB底色漆<sup>[8]</sup>。对于罩光清漆,与其相关的术语1K和2K在汽车行业比较常用。1K罩光清漆通常是指涂料系统运送到汽车OEM时其配方中可以同时含有树脂和交联剂;2K罩光清漆通常是指涂料配方中的树脂和交联剂必须单独装运,并在准备喷涂到车体时才进行混合。一个典型的2K罩光清漆例子是羟基官能树脂与聚异氰酸酯反应形成聚氨酯交联涂层<sup>[8]</sup>。

图2是一个高度简化的涂装工艺示意图,它概括了在涂装车间喷涂和固化整个涂料系统的过程。传统的涂装工艺被称为“3涂2烘”(3C2B),是指该工艺含有3个喷涂步骤和2个烘干步骤。类似的,紧凑型涂装工艺被称为“3涂1烘”(3C1B)。

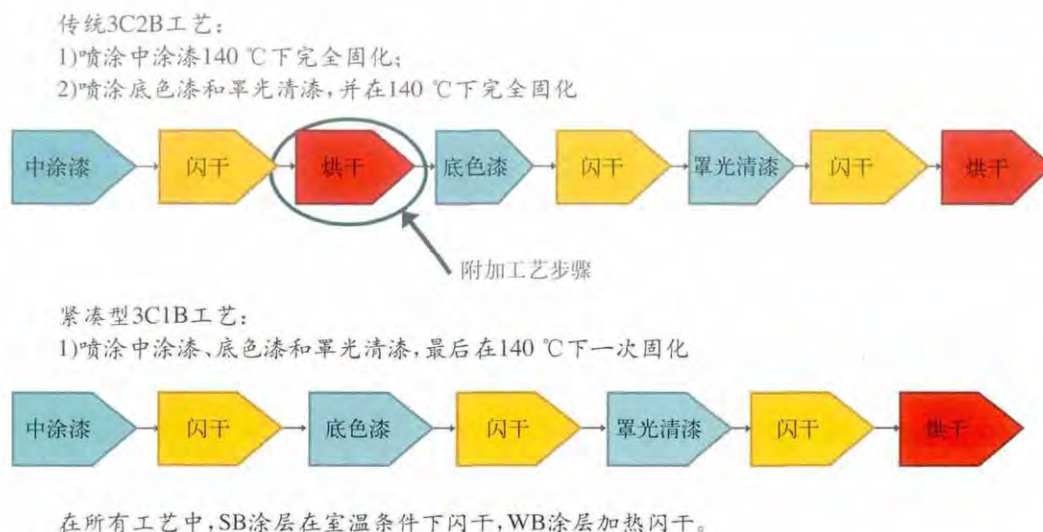


图2 涂装车间一般基础知识  
Fig. 2 Generalized Paint Shop Basics

紧凑型工艺在应用中涂漆、底色漆和罩光清漆时采用“湿碰湿碰湿”法(3湿);在这种情况下,中涂漆层和底色漆层通常称为B1和B2层。3C1B和3C2B之间的主要区别是,紧凑型工艺不需要中涂漆烘烤炉。在目前的3C1B技术中,HSSB技术(用3C1B-SB-1K表示)需要的投资成本和运营成本通常低于WB紧凑型技术。

溶剂的选择直接影响每个涂层的闪干要求。WB涂层需要加热闪干,SB涂层可以在室温条件下闪干。电泳涂装后的设备由输送机搬运通过经空气温湿度调节的喷漆室(配备机器人喷涂设备)、闪干区和烘烤炉。减排系统包括洗涤器、浓缩器和蓄热式热氧化器等设备。

### 1.3 LCA已有研究

在决定进行LCA研究后,伊士曼检索了相关文献和现有的LCA数据库。除了前面提到的福特和巴斯夫/杜尔的演示报告,并没有检索到其他关于汽车涂料或涂装车间工艺的LCA研究。

伊士曼使用了GaBi LCA软件中的一个涂料数据库<sup>[9]</sup>,其中包含关于3C2B水性技术场景(2K罩光清漆)产品体系的生命周期清单数据集。虽然该数据集反映的是德国的情况且只考虑单一的技术场景,但它提供了一个近似的基准。

此外,美国国家制造科学中心(NCMS)已出版了<sup>[10]</sup>一个基于Excel的LCA工具,称为“涂料顾问”(Coatings Counselor)。该项目由美国环保局资助,参

与者包括汽车OEM以及供应商和专业学者。Excel模型的设计旨在计算汽车OEM涂装车间“从摇篮到大门”的GHG和VOC清单。该工具提供了一个有较大涵盖范围的计算平台,但很多计算所需的数据栏是空白等待填充。

缺乏高质量的数据是伊士曼开展LCA研究的主要障碍,因此伊士曼签订协议聘请IHS汽车行业解决方案(IHS Automotive Industry Solutions)作为顾问,为研究提供具有代表性的行业数据。IHS的数据被编辑到Excel电子表格中,伊士曼在其中添加了GHG和VOC的LCA计算结果。

## 2 研究部分

### 2.1 研究目标

#### 2.1.1 目标和范围

伊士曼研究的目标是完成一项独立的关于OEM汽车涂料的生命周期评价,重点探讨5种涂装技术系统在GHG影响和VOC排放方面的相对差异。底色漆技术的选择是技术方案中的一个关键变量。本研究分析的技术代表了截至2013年已被商业化的主要技术。本研究的目标是通过比较通用工艺技术类别来帮助理解差异和制定决策,而不是对特定厂商、OEM或技术提供商进行详细比较。执行该项研究的原因是为了使伊士曼能更好地制定自身的策略,更好地理解不同技术的差异,并能更好地与外部合作伙伴和其他相关方交流其学术见解。本研究所涉及

的系统是涂层材料的生产及其在标准汽车表面的应用。生命周期的边界是“从涂料到成品车涂装”,其包括原料生产、涂料配方以及在涂装车间的应用和固化,但不包括基底(未经涂装的白车身)的制造生命周期。本研究的范围仅包括涂层系统及其相关作业。涂装车间的边界包括所有的辅助系统,如调漆间、手工区、通风系统等。减排系统采用IHS汽车公司(IHS Automotive)的建议,反映的是典型设计。除非另有说明,废物处理系统也包括在研究范围内。VOC的排放也包含涂装车间的逸散性排放(Fugitive Emissions)。研究假定清洗溶剂(用于冲洗、清洁等)是在一个闭环系统中全部回收的。由于缺乏数据,并且每辆汽车消耗的清洗溶剂较少(清洗溶剂主要在更换材料时使用),因此车间外第三方溶剂回收过程不包括在本研究范围内。本研究旨在评价每个技术场景的代表性

配置,但不反映任何明确的OEM或供应商的设计偏好或技术。

对于VOC分析,研究范围仅限于涂装车间(即“门到门”)。这是因为本研究只比较涂装车间的VOC排放与潜在的监管限值。

本报告研究的5种技术场景参见表1。评价所使用的系统边界如图3中所示。

表1 技术场景

Table 1 Technology Scenarios

| 缩写           | 说明                 |
|--------------|--------------------|
| 3C2B-WB-1K   | 传统WB底色漆和1K罩光清漆     |
| 3C2B-WB-2K   | 传统WB底色漆和2K罩光清漆     |
| 3C2B-LSSB-1K | 传统低固含SB底色漆和1K罩光清漆  |
| 3C1B-SB-1K   | 紧凑型高固含SB底色漆和1K罩光清漆 |
| 3C1B-WB-1K   | 紧凑型WB底色漆和1K罩光清漆    |

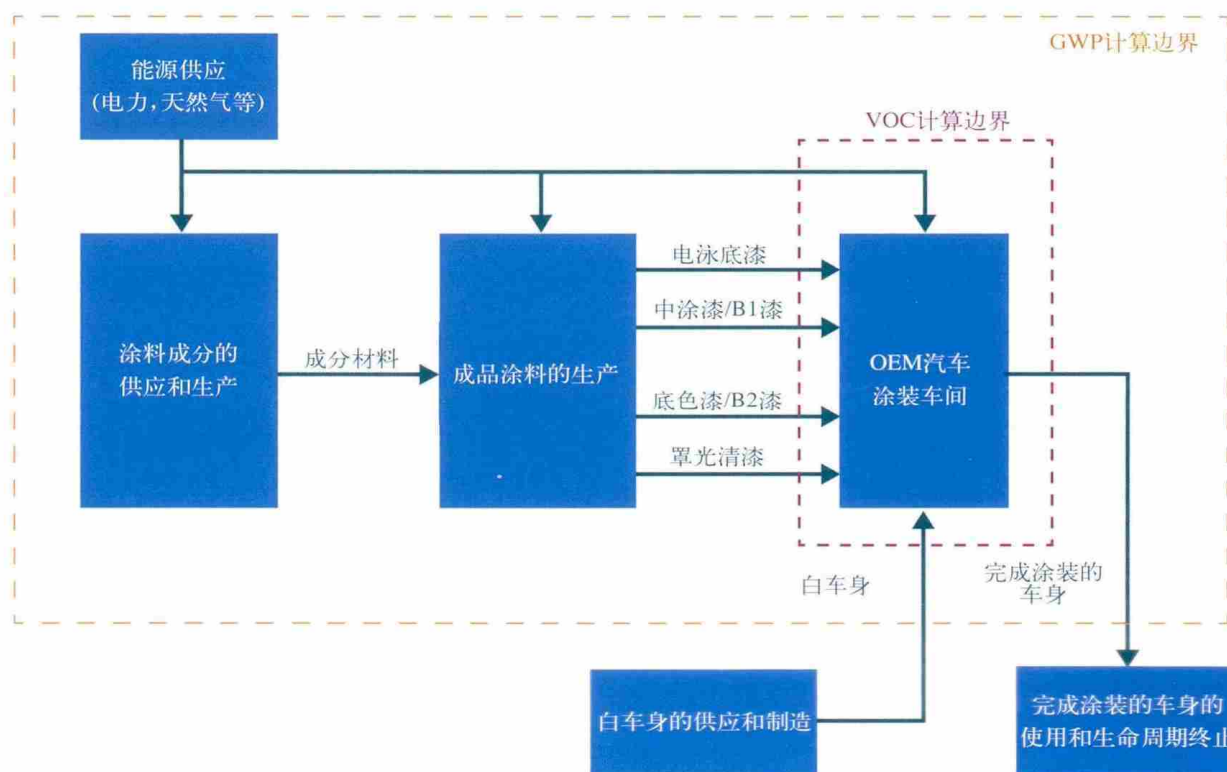


图3 系统边界

Fig. 3 System Boundaries

### 2.1.2 功能单元和设计基础

本研究的功能单元是一个涂装后的车身,其表面涂装面积如表2所示。每一个涂层涂装到特定的表面区域。假设这是一款小型C类乘用车(即福特福克斯、本田思域或类似车型),拥有标准涂层外观并满足功能质量要求。在此研究中的每个技术场景的设计

均满足这些功能需求。根据IHS提供的信息,在所有技术场景中,对C类车辆涂层的功能要求是同等。

每个技术场景都假设是一个年产量为250 000辆、实行两班制生产的世界级汽车生产工厂。所有技术场景都假设在中国重庆首次安装,并采用代表2005-2013年建成的涂装车间的最先进技术。IHS和

表2 表面区域基础  
Table 2 Surface Area Basis

| 区域            | 面积                 |                   |
|---------------|--------------------|-------------------|
|               | 英制/ft <sup>2</sup> | 公制/m <sup>2</sup> |
| 车身表面区域(电泳底漆)  | 1 050              | 97.5              |
| 车身外部涂装区域(中涂漆) | 350                | 32.5              |
| 车身外部涂装区域(面漆)  | 318                | 29.5              |

伊士曼尽力将潜在的OEM特定设计变量(例如偏好、海拔、气候等)标准化,以便对不同技术进行直接比较。

## 2.2 研究方法

### 2.2.1 LCA标准

下述LCA标准用于指导本研究:

——ISO 14044:2006

——温室气体协议产品生命周期计算和报告标准(2011)

### 2.2.2 数据采集与质量

伊士曼和IHS共同协作采集数据。来自伊士曼涂料技术(Eastman Coatings Technology)的技术人员基于文献资料和技术专长开发模型涂料配方。IHS公司充分发挥其汽车和化工团队的专业能力,并与汽车制造商、涂装车间供应商、汽车涂料供应商、自动化制造供应商、排放专家以及公有领域资源(许可证等)合作,采集具有代表性的涂装车间数据并验证伊士曼提供的模型涂料配方。该数据集经过严格审查并通过多轮验证和修订予以完善。可以认为数据具有可靠性并代表了目前的行业实际。

有关涂料制造成分的“从原料到成品”的GHG影响数据采集自GaBi软件中的可用数据库。这些数据大多数来自PE-GaBi 2011和Ecoinvent 2.2数据库。关于醋酸丁酸纤维素、乙氧基丙酸乙酯(EEP)、乙二醇醚、间苯二甲酸、甲基异丁基酮(MIBK)、丁醇、新戊二醇和乙酸丁酯的LCA数据来自已有的伊士曼LCA研究。对有些原材料,特别是树脂,由于缺乏数据,有时只能用基于一定经验的近似数据替代。

涂料制造过程中研磨和混合各组分消耗的能量采用了美国涂料协会的NCMS涂料顾问(Coatings Counselor)所提供的数据。

### 2.2.3 数据完整性

伊士曼力争在LCA研究中纳入所有相关的流程。但基于可行性,有时需要排除不重要的流程。但估计该研究至少涵盖了95%的质量输入。从这项研究的结果看,GWP(全球变暖潜能值)主要来源于涂装车间的电力和天然气消耗量。

在涂装车间有些材料和流程对GWP和VOC的影响很小,而且这些因素在5种涂装车间技术之间应该

是很相近的,因此在计算中我们忽略了这些因素。由此得出的结果不会影响本研究的目标,即比较各不同技术之间的差异。排除的材料和服务包括:

——消耗品的供应和处置(如过滤器、喷漆室化学品、容器等);

——涂装车间废水处理;

——到涂装车间和配方室的材料输送;

——涂料污泥处置(涂料污泥可填埋或根据市场需求作为副产品出售,无论采取哪种方式,预计在研究场景中将有相对最小的影响);

——基础设施和资本物品。

### 2.2.4 数据分配

在这项研究中没有进行数据分配。一些原始数据采集自己发表的生命周期清单数据库(如ecoinvent和PE-GaBi)。

### 2.2.5 影响评价

2013年,汽车涂装车间系统最相关的问题是VOC排放和GHG影响。因此,本研究将着重关注这些问题。

GHG影响根据政府间气候变化专门委员会<sup>[11]</sup>公布的气候表征因素,基于100年全球变暖潜能值进行评价。报告结果用汽车每个涂层的CO<sub>2</sub>当量表示。通俗地讲,一个系统的净GWP影响通常被称为其“碳足迹”。

VOC排放量用流向环境的总VOC的生命周期清单流量表示。个别VOC种类的化学特性未跟踪。

### 2.2.6 排放因子

与电力消耗相关的GHG影响基于PE-GaBi 2011数据库进程“CN: 电网结构”,其反映的是中国的假定电网结构(78%煤、16%水力、2%核能、1%风能和太阳能)。GWP因子为1.001 kg CO<sub>2</sub>/(kW·h),其中包括燃料的提取、生产和运输过程以及废物管理等。

与生产和燃烧天然气产生热能相关的GHG影响基于PE-GaBi 2012数据库进程“CN: 来自天然气的热能”,反映的也是中国区域的状况。GWP因子为0.070 4 kg CO<sub>2</sub>eq/MJ LHV(每兆焦耳低热值0.070 4 kg二氧化碳当量),其中包括天然气供应链中的提取、纯化和压缩等过程。

### 2.2.7 关键性审查

内部关键性审查由伊士曼涂料技术与生命周期评价专家执行。由于比较结果要向公众披露,正式的关键性审查已被一个由BAMAC Ltd.主导的独立专家小组依据ISO14040和14044标准组件的独立专家小组执行并获得通过。

(未完待续)

收稿日期 2014-09-22