

包材水性紫外光固化涂料的生命周期评价

李炜祥, 徐廉久, 余立刚, 刘磊
(浙江佑谦特种材料有限公司, 浙江绍兴 312000)

摘要: 运用生命周期评价(LCA)理论和SPOT METHOD评价方法,参考Ecoinvent数据库对溶剂型紫外光固化涂料与水性紫外光固化涂料对环境 and 人体的影响进行评价。数据显示,与溶剂型紫外光固化涂料相比,涂料生产阶段亮/哑光水性紫外光固化涂料对气候变化、人体生命健康、颗粒物质的排放、水资源及环境毒性等方面的影响降低了38%和44%,涂料应用阶段分别降低了39%和61%。水性紫外光固化涂料应用过程中采用温湿控制会增加对能源的消耗,而使用干式回收可有效降低LCA数值。

关键词: 生命周期评价;水性紫外光固化涂料;可持续发展;环境指标;尾气处理

中图分类号: TQ630.7

文献标识码: A

文章编号: 1006-2556(2022)04-0023-08

DOI: 10.13531/j.cnki.china.coatings.2022.04.004

Life Cycle Assessment of Waterborne UV Coatings for Packaging Materials

LI Wei-xiang, XU Lian-jiu, YU Li-gang, LIU Lei
(Zhejiang UVCHEM Special Coatings Co., Ltd., Shaoxing 312000, Zhejiang, China)

Abstract: The impact of solvent-based UV coatings and waterborne UV coatings on the environment and human body was evaluated via life cycle assessment (LCA) theory and SPOT METHOD with reference to the Ecoinvent database. The data showed that compared with solvent-based UV coatings, the effects of bright/matt waterborne UV coatings on climate change, human life and health, particulate matter emissions, water resources and environmental toxicity were reduced by 38% and 44% in the production stage and 39% and 61% in the coatings application stage, respectively. In the application of waterborne UV coatings, control of temperature and humidity will increase energy consumption, while dry coatings recovery can effectively reduce the LCA value.

Key words: life cycle assessment, waterborne UV coatings, sustainable development, environmental indicator, exhaust gas treatment

0 前言

中国涂料工业协会在2021年发布了《中国涂料行业“十四五”规划》(以下简称《规划》),指明了行业发展方向。《规划》指出,涂料行业将与国家整体发展战略保持一致,实现可持续增长,坚持绿色发展和“绿水

青山就是金山银山”的发展理念。

尽管在涂料行业中溶剂型紫外光固化涂料一直占据紫外光固化涂料主体地位,但适当降低涂料工业对环境 and 人体的影响势在必行,尤其是对于化妆品包材涂料,因为化妆品包材在人们的日常生活中大量使

收稿日期: 2022-03-12

作者简介: 李炜祥(1994—),男,河南鲁山人。硕士,主要从事水性UV涂料在化妆品包材领域的研发和应用的研究工作。

用,化妆品和皮肤的接触也更频繁,更紧密^[1]。一般普通溶剂型紫外光固化涂料因含有机溶剂,在生产和施工的过程中容易导致挥发性有机化合物(VOC)的扩散,对人体和环境带来负面影响^[2]。相对而言,水性紫外光固化涂料VOC挥发少,对人体及环境几乎没有危害,是绿色友好型产品。水性紫外光固化涂料在温室气体的排放、生产应用过程中对水、煤炭等自然资源的消耗、后续废弃物的处理、对生产施工人员健康的影响等各个方面具有巨大的优势,近年来受到了越来越多的关注。然而由于评价涂料的可持续发展性涉及因素过多,实际操作起来十分复杂,不借助特定的工具很难对所有具体环境因素量化和加权评测,因此有必要找到合适的系统评价工具,以达到全面、细致、精准地评价涂料可持续发展性的目的。

国际标准化组织定义了生命周期评估(LCA)的研究对象是产品系统的环境影响,包括产品全部寿命即从“摇篮”到“坟墓”的全过程,涉及量化并评价产品生产、运输、销售、使用、回收、维护和最终处置等各个阶段产生的环境影响,并给出减少这些影响的建议。LCA是评价涂料对环境影响的重要工具,它能够非常标准化地量化环境和人为影响因素,并计算出产品全生命周期对环境的影响,对促进整个工业社会的可持续发展十分重要。国内外学者已经有了一些关于LCA研究的论述,例如孟宪策等利用LCA工具评价了聚乳酸、聚碳酸酯-聚碳酸亚丙酯等对环境的影响,结果表明这几种树脂均在生产阶段对环境产生较大影响^[3];Wu等使用LCA研究工具对低密度聚乙烯和聚氨酯等食品包装材料的环境性能进行评价,认为低密度聚乙烯和聚氨酯的生产过程对环境影响最大^[4];Pierce等介绍了伊士曼完成的一项实验,他们比较了5种代表性的汽车涂料的温室气体和VOC排放情况,发现采用水性技术很大程度上降低了温室气体和VOC的排放^[5];Lemesle等采用LCA方法比较生物基和油基涂层的环境影响,结果显示使用生物基树脂和绿色溶剂对改善工艺环境和减少能源消耗更为有利^[6]。国内的LCA研究起步较晚,还没有形成完备的行业标准和评价体系,相关数据库的建立也不是非常全面,因此我们和第三方机构合作来评价水性化妆品包材涂料,就高光/亚光水性紫外光固化涂料与普通溶剂型紫外光固化涂料作对比,从中挖掘水性紫外光固化涂料对可持续发展的价值。

1 研究方法

1.1 研究目的

多方面对水性紫外光固化涂料进行生命周期评价,评估其从生产到施工生命周期过程对气候变化、

人体生命健康、颗粒物质的排放、水资源及环境毒性的影响,并与溶剂型紫外光固化涂料作对比,分析水性紫外光固化涂料对国内化妆品包材涂料工业的意义。

1.2 研究方法及系统边界

我们与第三方机构合作,参考SPOT 2021 Method和Ecoinvent数据库,依据国际标准ISO 14044、ISO 14040和GB/T 24040—2008《环境管理 生命周期评价 原则与框架》,对水性高光/亚光罩光涂料的生命周期进行评价,系统边界是“从涂料生产到应用”,即从“摇篮”到“大门”的过程。因为水性紫外光固化涂料在消费者终端使用过程中对环境和人体的影响极小,所以我们没有将这一过程纳入到我们的评价系统内,这种考量涉及到本研究对LCA参考数据的“取舍原则”^[7]。“取舍原则”大致如下:

- (1)产品从生产到应用的全过程中,施工人员及生活设施、道路及厂房等基础设施产生的损耗忽略不计;
- (2)所有有毒有害物质应全部列出;
- (3)任何形式的能源及原材料输入均列出;
- (4)一些原料的边角料可直接回收用作原料,故可以忽略。

涂料生产和应用全过程使用中国国家电网,企业安全生产标准化水平符合AQ/T 9006的要求。生产部分评估代表生产800 kg水性或溶剂型紫外光固化涂料(包括产品包装过程)对人与环境产生的影响。应用部分评估包括使用54 kg水性/溶剂型涂料在10万件产品上进行喷涂、干燥、固化、废弃物处理等过程对人和环境产生的影响,每件产品的喷涂面积是25 cm²,水性和溶剂型紫外光固化涂料的利用率相同(>98%)。系统评价边界如图1所示。

在评估涂料对环境影响的过程中,总是有大量的环境指标可供选择。一般来说大多数相关指标的总和应至少占全部影响的80%,而与研究涂料最相关的指标是:气候变化、人体生命健康、颗粒物质的排放、水资源及环境毒性,这几项约占全部影响的80%,详情如图2所示。

2 LCA研究结果

2.1 涂料配方及其LCA研究

溶剂型与水性紫外光固化涂料不同配方的成分具有较大的区别,其对环境的影响也不尽相同,表1内数据代表生产800 kg涂料所需的各项原材料。所有的LCA研究数据都是经过标准化处理和加权计算的结果,标准化代表相对于标准值,涂料产品对环境影响的相对大小,加权计算是计算LCA结果时,产品对环境影响值的系数。SPOT方法内各项环境指标的标准化参考值和权重如表2所示。



图1 系统LCA研究边界
Fig. 1 Boundary of Systematic LCA Research

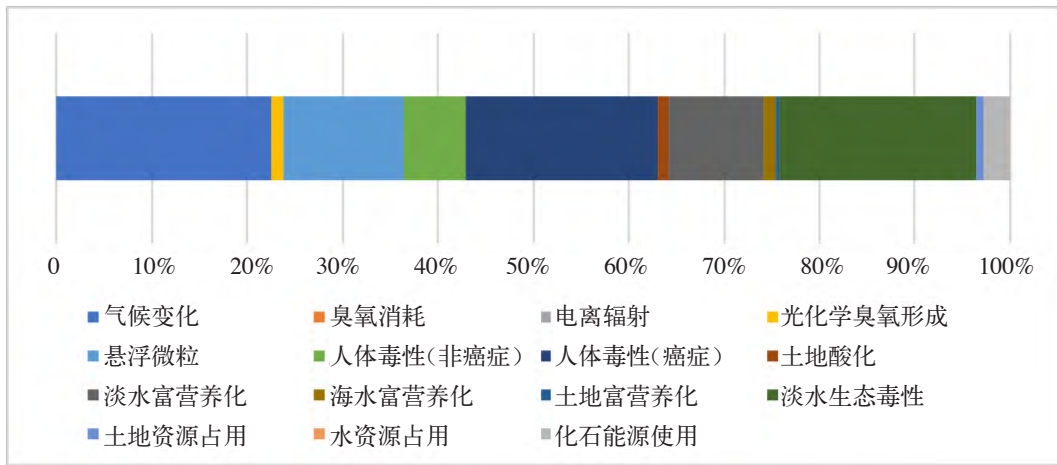


图2 各环境指标占比
Fig. 2 Proportions of Various Environmental Indicators

水性、溶剂型紫外光固化涂料配方及各组分含量见表3和表4。

从表3和表4可以看出，水性紫外光固化涂料原料中的树脂对LCA值贡献超过一半，而溶剂型紫外光固化涂料原料中占比最高的是溶剂，这是因为溶剂型紫外光固化涂料含有大量的VOC，对人体和环境影响巨大，亚光水性紫外光固化涂料原料包含的亚光助剂所产生的LCA值占比不高，仅为1%。

本次LCA研究过程包含涂料产品的全生命周期包括原材料的获取、涂料的生产和加工改进、包装及运输、客户车间应用、废弃物回收及后处理等各个部

表1 高光、亚光涂料配方
Table 1 Formulas High-gloss and Matt Coatings
单位: g

配方原材料	亮光罩光涂料		亚光罩光涂料	
	溶剂型	水性	溶剂型	水性
光引发剂	25.40	27.14	17.00	20.05
树脂	204.20	303.39	136.00	137.00
单体	173.97	119.76	115.5	186.00
添加剂	9.02	11.98	6.00	15.50
亚光助剂	0.00	0.00	40.00	95.00
有机溶剂	387.42	49.5	485.50	10.00
水	0.00	288.22	0.00	336.00

表2 环境指标的标准化参考值和权重

Table 2 Standardized Reference Values and Weights of Environmental Indicators

环境指标	标准化参考值	权重
气候变化	0.000 123 5	0.255
臭氧消耗	18.64	0.007 55
电离辐射	0.000 237	0.000 4
光化学臭氧形成	0.024 63	0.014 7
悬浮微粒	0.4	0.163
人体毒性(非癌症)	26 304	0.015 837 56
人体毒性(癌症)	1 821	0.015 837 56
土地酸化	0.018	0.014 5
淡水富营养化	0.622 3	0.087 8
海水富营养化	0.051 16	0.015
土地富营养化	0.005 658	0.008 3
淡水生态毒性	0.000 111 05	0.023 1
土地资源占用	0.000 001 22	0.254
水资源占用	0.000 087 19	0.014
化石能源使用	5.181 347 15	0.111 3

分。生产和实验使用湿式喷房,因此在生产和应用过程中均需要用到水帘循环来吸收部分固/液体废弃物。在循环水中加入絮凝剂用以沉淀溶入水中的部分化学物质,后续材料包括过滤棉、过滤袋、活性炭、清洗溶剂(如乙酸乙酯)等。

在涂料生产阶段,原料及资源投入和输出如表5和表6所示,包含原材料的获取、涂料的生产和加工改进、包装及运输、废弃物回收及后处理等步骤,代表生产800 kg水性/溶剂型紫外光固化涂料的LCA数值(包括包装部分)。

从表5和表6中可以看出,在高光/亚光水性紫外光固化涂料和溶剂型紫外光固化涂料生产过程的LCA研究中,配方内的原料输入均超过一半,尤其是溶剂型紫外光固化涂料,占比超过7成,比水性紫外光固化涂料的全部还要多。高光和亚光的水性LCA总数值相比溶剂型分别降低了38%和44%,其中原材料的影响最为显著,这可能是因为溶剂型紫外光固化涂料原材料中有机溶剂的挥发远大于水性紫外光固化

表3 水性、溶剂型高光罩光涂料系统对环境的影响值的评估

Table 3 Evaluation of the Environmental Impact Values of Waterborne and Solvent-based High-gloss Finish Systems

单位: mPt

产品类型	引发剂	添加剂	树脂	单体	水	溶剂	总计	对比/%
溶剂型RM	8.32	—	87.37	120.66	—	199.71	416.06	-51
溶剂型RM占比/%	2	0	21	29	0	48		
水性RM	8.09	4.04	133.43	28.30	—	28.30	202.16	
水性RM占比/%	4	2	66	14	0	14		

表4 水性、溶剂型亚光罩光涂料系统对环境的影响值的评估

Table 4 Evaluation of the Environmental Impact Values of Waterborne and Solvent-based Matt Finish Systems

单位: mPt

产品类型	引发剂	添加剂	树脂	单体	水	亚光助剂	溶剂	总计	对比/%
溶剂型RM	5.58	-	75.14	77.99	—	1.64	249.64	409.99	-60
溶剂型RM占比/%	1	0	18	18	0	1	60		
水性RM	6.15	5.22	102.74	42.51	—	1.64	5.66	163.92	
水性RM占比/%	3	3	51	21	0	1	3		

表5 高光涂料生产过程对环境的影响值的评估

Table 5 Evaluation of the Environmental Impact Value of the High-gloss Coatings Production Process

单位: mPt

LCA研究	配方原料	其他耗材	上游运输	生产输入	生产输出	原料包装	运输包装	生产包装	总计	对比/%
溶剂型	416.06	—	—	8.79	43.95	90.83	—	26.37	586	-38
溶剂型占比/%	71.0	0.0	0.0	1.5	7.5	15.5	0.0	4.5		
水性	202.16	—	—	10.83	21.66	93.86	—	32.49	361	
水性占比/%	56.0	0.0	0.0	3.0	6.0	26.0	0.0	9.0		

表6 亚光涂料生产过程对环境影响值的评估
Table 6 Evaluation of the Environmental Impact Value of the Matt Coatings Production Process

单位: mPt										
LCA研究	配方原料	其他耗材	上游运输	生产输入	生产输出	原料包装	运输包装	生产包装	总计	对比/%
溶剂型	409.99	—	—	8.79	43.95	90.83	—	26.37	560	—44
溶剂型占比/%	71.7	0.0	0.0	1.5	7.6	15.7	0.0	4.5		
水性	163.91	—	—	10.83	21.66	93.86	—	32.49	323	
水性占比/%	50.8	0.0	0.0	3.4	6.7	29.1	0.0	10.1		

涂料。

据：工人值1班，11个工时，应用10万件产品，两种涂料均消耗了54 kg水性和溶剂型紫外光固化涂料。具体情况如表7所示。

2.2 涂料应用全过程LCA研究结果

2.2.1 水性高光涂料LCA研究结果

高光罩光涂料的LCA测试按照以下情况收集数

表7 高光涂料应用全过程对环境影响值的评估
Table 7 Evaluation of the Environmental Impact Value of the Whole Process of High-gloss Coatings Application

单位: mPt									
产品类型和过程	涂料输入	喷涂输入	喷涂输出	烘烤	UV固化	尾气处理	废弃物	LCA结果	对比/%
溶剂型高光实际数据	39.96	26.64	39.96	13.32	39.96	270.84	13.32	444.00	0
水性高光实际数据	23.38	27.97	36.74	19.98	40.08	120.24	3.34	271.73	-39
水性高光+温湿控制	23.38	70.14	36.74	40.08	40.08	120.24	3.34	334.00	-25
水性高光+温湿控制+干式回收	23.38	70.14	20.41	40.08	40.08	98.55	1.67	294.31	-34

如表7所示，实验对比了溶剂型高光紫外光固化涂料、水性高光紫外光固化涂料、严格控制温湿度的水性高光紫外光固化涂料、增加干式回收等不同产品过程的LCA研究结果，其中前两者是实际测试结合算法得到的结果，后两者是根据算法和实际数据推导出的模拟结果。从表7可知，水性高光紫外光固化涂料可比溶剂型高光紫外光固化涂料减少39%对人体和环境的影响。溶剂型高光紫外光固化涂料的涂料输入部分明显比水性高光紫外光固化涂料多，因为其配方内含有大量VOC。另外，在对喷涂环境进行非常严格的温湿度控制时，会加速能源的消耗，从而提高喷涂输入部分的LCA数值。关于尾气处理部分的LCA数值占比，溶剂型高光紫外光固化涂料达到61.00%，大于水性高光紫外光固化涂料的44.25%（当采用温湿控制和干式回收时降低到33.49%）。值得注意的是，水性高光紫外光固化涂料和溶剂型高光紫外光固化涂料的废水处理步骤在LCA研究中表现为无差别，若水性高光紫外光固化涂料采用干式回收策略，相对于湿式喷房节省了水帘和喷淋塔的使用，从而减少了废水排放及其能源消耗，节约资源尤其是水资源的消耗，降低了LCA数值，与溶剂型高光紫外光固化涂料相比在采用温室控制的条件下节省效果仍达到34%。图3清晰地

展现出几种产品过程的LCA值占比情况。

从图3可以看出，尾气处理部分对LCA数值贡献最大，特别是溶剂型高光罩光紫外光固化涂料数值超高。水性高光罩光紫外光固化涂料这部分的LCA值大大降低，而增加温湿控制步骤后喷涂输入和烘烤的LCA值明显变大。在采取干式回收后，喷涂输出的LCA数值减少。

2.2.2 水性亚光涂料的LCA研究结果

水性亚光涂料LCA研究结果与溶剂型亚光涂料差距明显，LCA数值降低幅度高达61%。具体如表8所示，代表涂装5万件表面积300 cm²瓶子的LCA数值。

水性亚光紫外光固化涂料与溶剂型亚光紫外光固化涂料相比，LCA数值降低61%。这主要是因为水性亚光紫外光固化涂料对烘烤时间要求较低，并且溶剂型亚光紫外光固化涂料VOC释放较高。如果采用干式回收并去除温湿控制，降低幅度达到66%。溶剂型亚光紫外光固化涂料含有大量VOC，因此涂料输入部分远大于水性亚光紫外光固化涂料。喷涂输入过程中采用温湿控制增加了能源消耗，导致LCA数值的提高。尾气处理部分溶剂型亚光紫外光固化涂料最高达到270.84 mPt，在这一阶段消耗大量电能。图4清晰地展现出LCA研究中各部分的贡献情况。

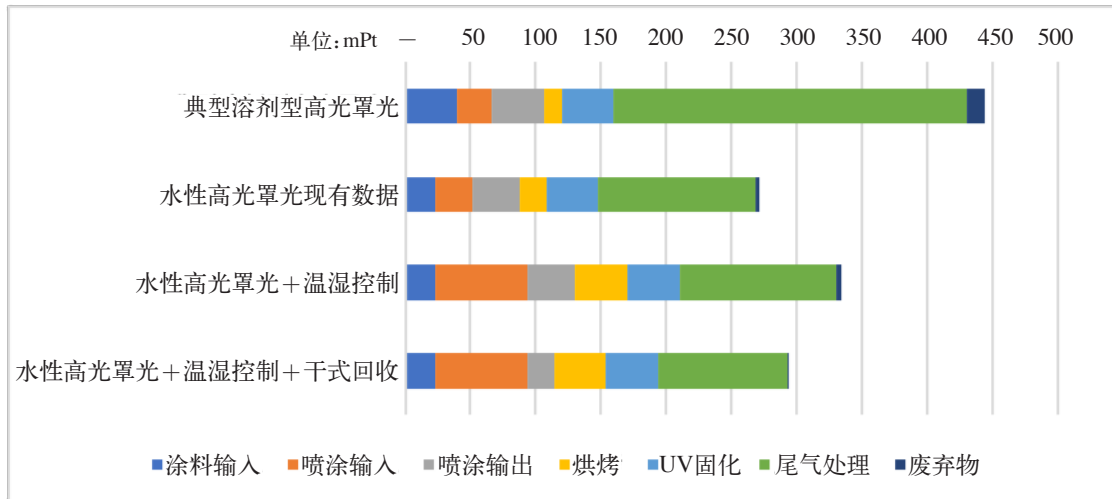


图3 水性和溶剂型高光罩光紫外光固化涂料不同过程的LCA对比

Fig. 3 LCA Comparison of Waterborne and Solvent-based High-gloss UV Finish in Different Processes

表8 亚光涂料应用全过程对环境影晌值的评估

Table 8 Evaluation of the Environmental Impact Value of the Whole Process of Matt Coatings Application

产品类型和过程	单位: mPt							LCA结果	对比/%
	涂料输入	喷涂输入	喷涂输出	烘烤	UV固化	尾气处理	废弃物		
溶剂型亚光实际数据	174.77	26.64	159.84	13.32	39.96	270.84	13.32	698.69	0
水性亚光实际数据	37.09	28.25	33.07	13.32	39.96	120.24	3.34	275.27	-61
水性亚光+温湿控制	37.09	70.14	33.07	13.32	39.96	120.24	3.34	317.16	-55
水性亚光+干式回收	37.09	28.25	18.37	13.32	39.96	98.55	1.67	237.21	-66
水性亚光+温湿控制+干式回收	37.09	70.14	18.37	13.32	39.96	98.55	1.67	279.10	-60

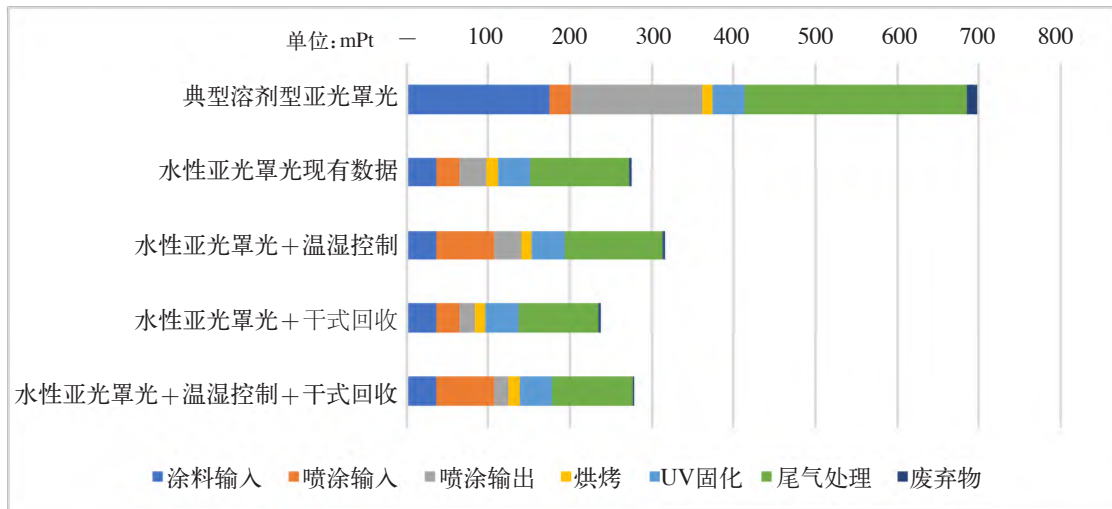


图4 水性和溶剂型亚光罩光紫外光固化涂料不同过程的LCA对比

Fig. 4 LCA Comparison of Waterborne and Solvent-based Matt UV Finish in Different Processes

从图4可以看出,水性亚光罩光紫外光固化涂料的LCA值相比于溶剂型亚光罩光紫外光固化涂料出现大幅降低,这主要得益于尾气处理、涂料输入、喷涂

输出等部分的LCA值降低。与高光罩光涂料类似,采用温湿控制的方法会增加烘烤部分的LCA值,而采用干式回收则降低了喷涂输出的LCA值。

3 尾气处理

在整个LCA研究体系中，尾气处理部分对结果影响最为显著，因为在涂料的生产和应用过程中，需要用到多重过滤装置，即使采用干式回收技术从而减去

了水帘和喷淋塔部分，其余过滤装置仍能消耗大量能源。本次LCA研究过程采用“废弃处理-RCO”技术，具体见图5。

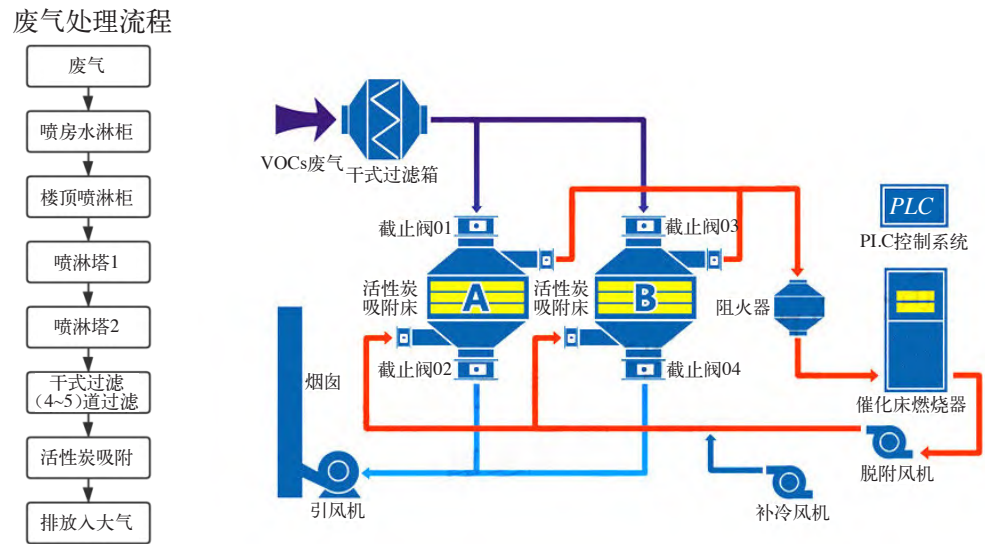


图5 废气处理与活性炭再生(RCO)
Fig. 5 Exhaust Gas Treatment and RCO

其中，活性炭的理论吸附处理有效性约为80%，到时需要更换，以保证尾气处理过程的有效性，部分废气需要天然气助燃，进行催化氧化燃烧后才能排入大气。

水性紫外光固化涂料VOC含量在喷涂状态小于10%，在VOCs总量合规的前提下，相应工序可以不用收集处理。尾气处理满足GB 37822—2019《挥发性有机物无组织排放及控制标准》中鼓励工业涂料源头替代的指导方针、《国务院节能减排综合方案》《浙江省

VOCs治理方案》等政府指导性文件。水性紫外光固化涂料施工在尾气排放阶段不需要经过活性炭吸附和催化氧化燃烧步骤，可以直排。喷房水淋柜、喷淋柜、喷淋塔、干式过滤等程序主要是为了拦截固体和液体废弃物，其中干式过滤包括过滤棉、过滤袋等。采用干式回收更可以省略喷淋塔、水淋柜、喷淋柜等，极大程度上节省了能源的消耗。亚光涂料尾气处理过程各部分的LCA研究如表9所示。

表9 尾气处理过程对环境影响值的评估
Table 9 Evaluation of the Environmental Impact Value of the Exhaust Gas Treatment Process

尾气处理	单位: mPt						总计	对比/%
	电能	水资源	过滤棉	过滤袋	活性炭	废水		
溶剂型	195.00	—	2.71	35.21	13.54	24.38	270.84	0
溶剂型占比/%	72	0	1	13	5	9		
水性	60.12	—	1.20	34.87	—	24.05	120.24	—56
水性占比/%	50	0	1	29	0	20		
水性干式	60.20	—	—	38.36	—	—	98.55	—64
水性干式/%	61	0	0	39	0	0		

电能在整个尾气处理过程中占据能源消耗的主要部分，采用干式喷房不产生废水，降低了尾气处理的资源消耗。

4 结 语

基于4项研究指标(气候变化、人体生命健康、颗粒物质的排放、水资源及环境毒性)，水性紫外光固

化涂料生命周期内对环境的影响比溶剂型紫外光固化涂料更小,高光和亚光水性紫外光固化涂料的生命周期对环境的影响与溶剂型相比分别降低了39%和61%。就涂料配方而言,水性/溶剂型紫外光固化涂料在LCA值中占比最大的分别是树脂和溶剂;涂料生产过程占比最大的是配方原料;在涂料应用全过程中,尾气处理部分是能耗最大的步骤。采用温湿控制可能增加能耗,而采用干式回收的方法能有效降低涂料整个生命周期对环境的影响。相对于水性高光罩光紫外光固化涂料,水性亚光罩光紫外光固化涂料具有更优的环境友好特性。镀膜涂料与罩光涂料相比对温湿度更敏感,水性镀膜涂料在采用温湿控制时其生命周期对环境的影响可能更大。

本次关于水性紫外光固化涂料的LCA研究对国内涂料行业LCA数据库的扩展以及涂料的LCA研究工作具有一定的借鉴意义。在以后的LCA研究中,针对不同的研究对象,所采用的方法和参考的数据库应有所区别,因为不同评价方法和数据库具有一定的差异性。一些企业在LCA研究过程中需要与上下游供应商和客户紧密联系,全面采集产品生命周期内的信息。本研究结果仅对应本文中使用的几种涂料,并不能代表所有其他的涂料产品。涂料水性化是必然趋势之一,国内市场机遇与挑战并存,国内涂料厂商在不断突破、创新研发的基础上,也应加强与下游客户的沟通合作,帮助其认知化妆品包材涂料市场的变化趋

势和水性紫外光固化涂料的巨大价值,建立和启动水性战略部署,实现与客户的共赢,为构建健康、和谐、绿色发展的社会做更多的贡献。

参考文献

- [1] 吴婷婷,单敏.化妆品安全监管体制探究[J].中国药事,2017,31(8):894-898
- [2] 荆夕庆,武春梅,李永,等.水性/高固含/无溶剂工业防腐涂料产品全生命周期的环保分析[J].涂料工业,2018,48(1):63-69
- [3] 孟宪策.聚碳酸酯和聚乳酸的生命周期评价[D].北京:北京工业大学,2010
- [4] WU J L, SHEN X P, JIANG L, et al. Solvothermal Synthesis and Characterization of Sandwich-like Graphene/Zno Nanocomposites[J]. Applied Surface Science,2010,256(9):2 826-2 830
- [5] PIERCE C J, SEELEY J.OEM汽车涂装车间技术的环境生命周期评价(一)[J].中国涂料,2014,29(10):22-26
- [6] LEMESLE C, FRÉMIOT J, BEAUGENDRE A, et al. Life Cycle Assessment of Multi-step Versus One-step Coating Processes Using Oil or Bio-based Resins[J]. Journal of Cleaner Production,2020,242:118527
- [7] 陈博.基于LCA研究模型的一种水性外墙涂料生命周期评价[J].能源与节能,2020,10(3): 68-69,98

中国涂料
CHINA COATINGS

