

DOI:10.16356/j.1005-2615.2020.01.010

绝热层制备工艺的环境影响分析

吕 锦¹, 铁 铎², 李育锋¹, 王禹林³, 谷振宇⁴

(1. 重庆大学机械传动国家重点实验室, 重庆, 400030; 2. 中国航空制造技术研究院, 北京, 100024;
3. 南京理工大学机械工程学院, 南京, 210094; 4. 重庆大学自动化学院, 重庆, 400030)

摘要: 聚氨酯泡沫绝热层被广泛应用在建筑、家电、汽车和航天等领域, 绝热层制备工艺对环境有着重要的影响, 因此评价绝热层制备工艺的环境影响有着十分重要的意义。本文采用生命周期评价(Life cycle assessment, LCA)中的 ReCiPe 方法对绝热层制备工艺的环境影响进行了评价。结果表明, 绝热层制备工艺对海洋生态毒性的环境影响最大, 其次是人类毒性、淡水生态毒性、淡水富营养化和化石耗竭; 油漆、电能、聚氨酯组合剂以及聚脲组合剂是对环境影响贡献较大的清单物质, 且环境影响结果对油漆和电能的变化最为敏感; 喷漆过程、聚氨酯喷涂过程和聚脲喷涂过程环境影响显著, 占比超过了总环境影响的 70%。降低绝热层制备工艺环境影响的关键因素有: 在设计阶段考虑聚氨酯废料的回收, 避免聚氨酯和聚脲材料的浪费, 选用较为清洁的粉末型涂料, 或者提高电能利用率、提高清洁能源的比例。

关键词: 生命周期评价; 绝热层; 聚氨酯; 环境影响; ReCiPe 方法

中图分类号: X828 **文献标志码:** A **文章编号:** 1005-2615(2020)01-0079-08

Environmental Impact Assessment of Thermal Insulation Layer Preparation Process

LYU Jin¹, TIE Duo², LI Yufeng¹, WANG Yulin³, GU Zhenyu⁴

(1. State Key Laboratory of Mechanical Transmission, Chongqing University, Chongqing, 400030, China;
2. AVIC Manufacturing Technology Institute, Beijing, 100024, China;
3. School of Mechanical Engineering, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing, 210094, China;
4. College of Automation, Chongqing University, Chongqing, 400030, China)

Abstract: Rigid polyurethane insulation layer is widely used in construction, household appliances, automobiles and aerospace, and the preparation process of thermal insulation layer has an important impact on environment. Therefore, it is of great significance to evaluate the environmental impact of the preparation process. The environmental impacts of the preparation process was conducted using ReCiPe method. It is confirmed that the thermal insulation layer preparation process has the greatest environmental impact on marine eco-toxicity, followed by human toxicity, freshwater eco-toxicity, freshwater eutrophication and fossil depletion. Paint, electricity, polyurethane and polyurea contribute greatly to the environmental impact, and the environmental impact results are most sensitive to paint and electricity. The painting process, the polyurethane and the polyurea spray process contribute more than 70% of the total result. The key factors that reduce the environmental impact include considering the recycle of polyurethane in design phase, avoiding waste of polyurethane and polyuria, using powder paint, improving efficiency of electricity and increasing the proportion of clean energy.

基金项目: 国家重点研发计划(2018YFB2002100)资助项目; 国家自然科学基金(51605058)资助项目。

收稿日期: 2019-07-12; **修订日期:** 2020-01-09

通信作者: 李育锋, 男, 讲师, E-mail: liyufeng@cqu.edu.cn。

引用格式: 吕锦, 铁铎, 李育锋, 等. 绝热层制备工艺的环境影响分析[J]. 南京航空航天大学学报, 2020, 52(1): 79-86.
LYU Jin, TIE Duo, LI Yufeng, et al. Environmental impact assessment of thermal insulation layer preparation process[J].
Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, 2020, 52(1): 79-86.

Key words: life cycle assessment; thermal insulation layer; polyurethane; environmental impact; ReCiPe method

聚氨酯泡沫材料具有独特的隔热保温特性,被广泛应用于建筑、冰箱、热水器,甚至是航天产品中^[1]。据中国聚氨酯工业协会统计,2018年中国聚氨酯泡沫的消费总量超过500万吨^[2]。其中,聚氨酯泡沫消费量接近聚氨酯产品的40%。但是,由于绝热层制备过程所使用的聚氨酯、聚脲等原材料的生产过程污染严重,且绝热层制备过程中颗粒物、挥发性有机化合物(Volatile organic compounds, VOC)等有害物质的排放,也都严重影响人类健康和生态环境。因此,评价绝热层制备工艺潜在的环境影响,对于确定绝热层制备工艺中的关键因素以及提出绿色化改进建议至关重要。

近年来,生命周期评价方法在环境影响评价中的应用越来越广泛。生命周期评价(Life cycle assessment, LCA)提供了一种方法框架,它分析作为研究对象的系统或产品的整个生命周期潜在的环境影响,如气候变化、富营养化、酸化、人类健康和土地使用等,并尝试对这些影响进行定量评估^[3]。国内外学者对绝热层的环境影响研究主要集中在制备绝热层的材料的生命周期分析上。Katz等人利用生命周期的方法,对比了HCF-22、HFC-134a和环戊烷几种辅助发泡剂对于制造聚氨酯硬泡的环境影响,结果表明环戊烷在制造和处理阶段的生命周期影响较低,其对臭氧耗竭和全球变暖的综合影响潜力最低^[4]。Batouli等人以硬泡聚氨酯(Polyurethane, PU)为原料,配以5%、10%和15%的洋麻纤维,制备了3种复合材料并与纯PU材料一起进行了生命周期分析,结果表明尽管洋麻纤维复合材料对环境的影响比纯PU材料小得多,但增加洋麻纤维在聚氨酯复合材料中的含量并不一定会减少对环境的影响^[5]。Niklas等人利用二氧化碳作为多元醇的替代碳原料,Cradle-to-gate的生命周期研究结果显示,CO₂在聚氨酯供应链中的直接使用可减少4 kg的CO₂当量排放以及2 kg的石油当量使用,同时化石资源消耗可减少13%~16%^[6-7]。Pargana等人对聚苯乙烯、聚氨酯等几种不同绝热材料在建筑中使用的环境影响进行分析,结果表明聚苯乙烯的环境效益最高^[8]。同样,国内学者马丽萍等运用生命周期评价方法对聚苯板、岩棉板、硬泡聚氨酯板3种建筑保温材料的环境影响进行了对比分析评价,结果显示,以“单位质量kg”计,岩棉板的生命周期环境影响最小,硬

泡聚氨酯板次之,聚苯板的环境影响最大^[9]。为了降低由传统聚合物生产带来的环境影响,Rosa等人从生命周期的角度对比分析了一种新型生物基聚合物与传统聚合物的环境效益,结果表明,与石油基的产品相比,生物基聚合物的生命周期评估在环境影响和能源使用方面显示出良好的结果^[10]。马丽萍等人还针对硬泡聚氨酯建筑保温材料进行了生命周期评价,结果表明,全球暖化和能源消耗是两类较重要的潜在环境影响类型^[11],不足的是,该研究并没有说明选择全球暖化等4种潜在环境影响类别的原因。然而,Mazor等人从生命周期的角度研究了从1971年到2025年,使用两种不同的刚性绝热产品所造成的温室气体排放的变化,其研究表明在建筑中使用硬泡聚氨酯绝热材料,能有效减少生命周期温室气体的排放^[12]。基于生命周期成本,Hasan提出了一种优化隔热材料厚度的系统方法,计算表明对岩棉和聚苯乙烯绝热层,每平方米面积可节省高达21美元^[13]。但Hasan并未对绝热层的环境影响进行分析。

可见,目前国内外关于绝热层的环境影响研究多集中在绝热层硬泡聚氨酯材料的生产过程中,或者新型材料替代聚氨酯材料的环境影响对比分析中。实际上,绝热层制备工艺过程除聚氨酯泡沫材料消耗外,还包括打磨、喷涂聚脲保护层和喷漆等工序,还有大量电能消耗和环境排放。并且,溶剂型漆料在中国的喷涂工艺中仍占有较大的比重,而溶剂型漆料会导致严重的环境污染问题。据不完全统计,中国溶剂型涂料的年消耗量在80万吨左右,每年要向大气中排放约40万吨挥发性有机化合物,对环境造成了严重的影响。因此,绝热层制备工艺的喷漆过程也不可忽视。本文综合考虑绝热层制备工艺的聚氨酯泡沫喷涂、打磨、聚脲保护层喷涂和喷漆等过程,系统地评价了绝热层制备工艺的生命周期环境影响,对识别绝热层制备工艺的关键因素,以及找出改善环境的方法都有着至关重要的意义。

1 方 法

1.1 目的和范围界定

本研究旨在通过生命周期评价方法对绝热层制备工艺进行环境影响分析,探究绝热层制备工艺过程中潜在的环境影响,同时找出绝热层制备工艺

中影响最为严重的关键环节,为绝热层制备工艺的绿化改进提供指导建议。

将加工 1 平方米面积的绝热层作为本研究的功能单位。绝热层的使用、运输和回收处理阶段的数据差异性很大,并且数据往往难以获取。因此,本研究的系统边界不考虑绝热层的使用、运输和回收处理阶段,仅考虑制备绝热层所需原材料和辅料的获取,以及绝热层制备工艺过程中的资源消耗、能源消耗和直接的环境排放,即进行绝热层制备工艺的 Cradle-to-gate 的生命周期评价。特别地,绝热层制备工艺中所使用设备的生命周期不包含在本研究中,只将设备的电能消耗作为能源的输入。此外,绝热层制备工艺过程中产生的聚氨酯废料和聚脲废料,按照人工收集后以焚烧的方式处理^[14]。

绝热层制备的主要工艺流程和本研究的系统边界如图 1 所示。其中,灰色部分表示本研究中不包含绝热层的使用、运输以及废弃处理阶段。

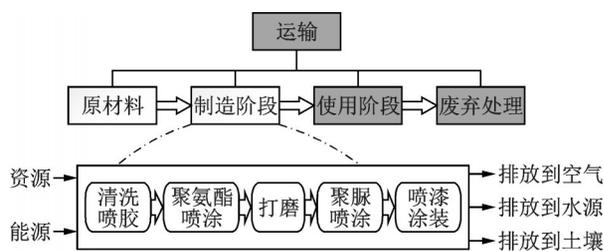


图 1 绝热层制备工艺的系统边界

Fig.1 System boundary of thermal insulation layer preparation process

1.2 绝热层制备工艺的数据清单

绝热层制备工艺主要包括清洗喷胶、聚氨酯泡沫喷涂、打磨、聚脲喷涂和喷漆 5 道工序：

(1)清洗喷胶工序包含清洗和喷胶两个过程。其中,清洗过程由清洗剂(乙醇)和丙酮溶液人工作业完成,除乙醇、丙酮外,不消耗其他物料和能源,使用过后的乙醇和丙酮直接排放;喷胶过程利用滚筒刷人工作业完成低温胶的涂覆。

(2)聚氨酯泡沫喷涂过程所用设备为 Reactor H40 系列聚氨酯泡沫喷涂机,消耗原料为聚氨酯泡沫组合剂。

(3)打磨工序分为粗磨和精磨两个过程,粗磨采用简易机械手臂完成,精磨采用普通角磨机完成,单位面积打磨过程中磨头等的消耗基本可忽略不计,因此可认为除电能外不消耗其他物料和能源。

(4)聚脲喷涂工序中,所用设备为 Reactor H20 系列聚脲泡沫喷涂机,消耗原料为聚脲组合剂。

(5)喷漆工序包括喷底漆和喷面漆。其中,漆料为溶剂型环氧树脂漆,与稀释剂按照规定比例混合,喷涂设备为无气喷涂机。

受中国企业的管理水平和数据监测等多方因素的限制,存在统计数据欠缺的问题,且部分数据不能按照生命周期评价所规定的方法直接获取。因此,本研究通过结合企业调研数据和参考国内外文献中的数据,以及引用国内外数据库中现存数据的方法,对缺失数据进行处理。

图 2 给出了绝热层制备工艺的输入输出模型图(Input-process-output, IPO),从图中可以得到本研究中的物质清单。其中,清单数据的计算及其来源主要为企业调研、数据库和国内外文献。电能背景数据采用 Wang 等人对于中国火力发电的研究结果^[15]。电能的用量通过设备的功率和加工时长计算得到,其中设备型号、额定功率和加工时长等数据为企业调研获得。制备绝热层所需的低温胶和聚氨酯组合剂、聚脲组合剂以及油漆和稀释剂等材料获取的背景数据参考 Ecoinvent 数据库中的数据^[16]。绝热层制备工艺所需的材料种类、消耗量等数据,也通过企业调研获取。直接的排放数据中,三苯(苯、甲苯和二甲苯)的排放参考了陈延平关于集装箱喷涂工艺的数据^[17],非甲烷挥发性有机化合物(Non-methane volatile organic compounds, NMVOC)和颗粒物的排放,参考 Papisavva 和 Rivera 等人关于汽车喷涂工艺的研究数据^[18-19]。需要说明的是,这里的 NMVOC 不再包含三苯的排放量。根据调研结果,聚氨酯和聚脲的利用率约 90%,废物做焚烧处理^[14]。油漆的利用率按 95% 处理。其他数据来自企业的环境检测报告,并通过数据分配得到。最终,得到制备 1 平方米绝热层所需的数据清单,如表 1 所示。

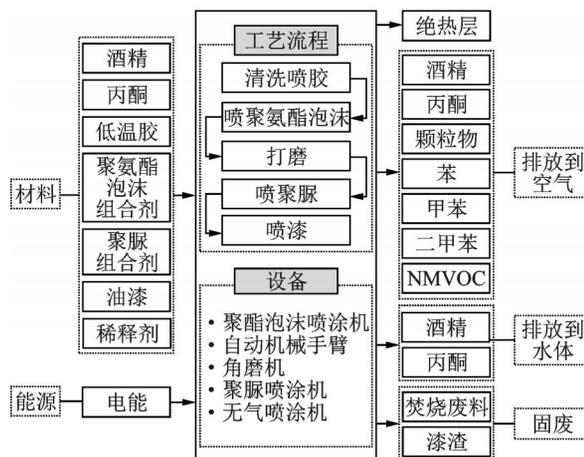


图 2 绝热层制备工艺的 IPO 模型图

Fig.2 IPO diagram of insulation layer preparation process

表1 绝热层制备工艺数据清单

Table 1 Data list of insulation layer preparation process
(1平方米为功能单位的数值)

数据类别	名称	数值
能源和材料消耗	电能/kWh	6.776
	乙醇/g	68.194
	丙酮/g	81.729
	低温胶/kg	0.346
	聚氨酯组合剂/kg	1.729
	聚脲组合剂/kg	1.383
	油漆/kg	0.768
	稀释剂/kg	0.332
排放到空气	苯/mg	68.440
	甲苯/mg	570.340
	二甲苯/mg	684.408
	乙醇/g	61.375
	丙酮/g	83.346
	NMVOC/g	78.535
	颗粒物/mg	122.490
排放到水体	乙醇/g	6.819
	丙酮/g	4.086
排放到土壤	焚烧废物/kg	0.389
	漆渣/kg	0.027 5

1.3 环境影响评价方法

根据国际标准化组织发布的标准 ISO 14040 和 ISO 14044, 生命周期环境影响评价的本质是为

了加深对生命周期清单阶段结果的理解^[20-21]。生命周期环境影响评价是针对清单分析所得结果, 用定量或定性的方法评价对环境的影响^[22]。到目前为止, 一些组织和机构已经提出了很多种不同的潜在环境影响评价方法。

为了将获得的清单数据转化为能够确定潜在环境影响的统一的影影响类别指标, 本研究采用生命周期评价中的 ReCiPe 环境影响评价方法^[23]。ReCiPe 方法是生命周期评价中最常用的指标方法之一, 它是建立在 Eco-indicator 99 方法^[24]和 CML 2000 方法^[25]的基础上, 并对 LCA 进行了一些修改。ReCiPe 方法定义了如下 18 种不同的中点影响类别指标: 气候变化、臭氧耗竭、人类毒性、光化学氧化剂形成、颗粒物形成、电离辐射、陆地酸化、淡水富营养化、海洋富营养化、陆地生态毒性、淡水生态毒性、海洋生态毒性、农业土地占用、城市土地占用、自然土地转换、水资源耗竭、金属耗竭和化石耗竭。ReCiPe 模型的详细方法和特征因素等, 可以在荷兰的莱顿大学环境科学研究所的网站上具体查询^[26]。

在 SimaPro 8.5.2 软件中完成生命周期评价的全过程。绝热层制备工艺过程的 SimaPro 软件模型简图如图 3 所示(图中展示的为海洋生态毒性的标准化结果)。

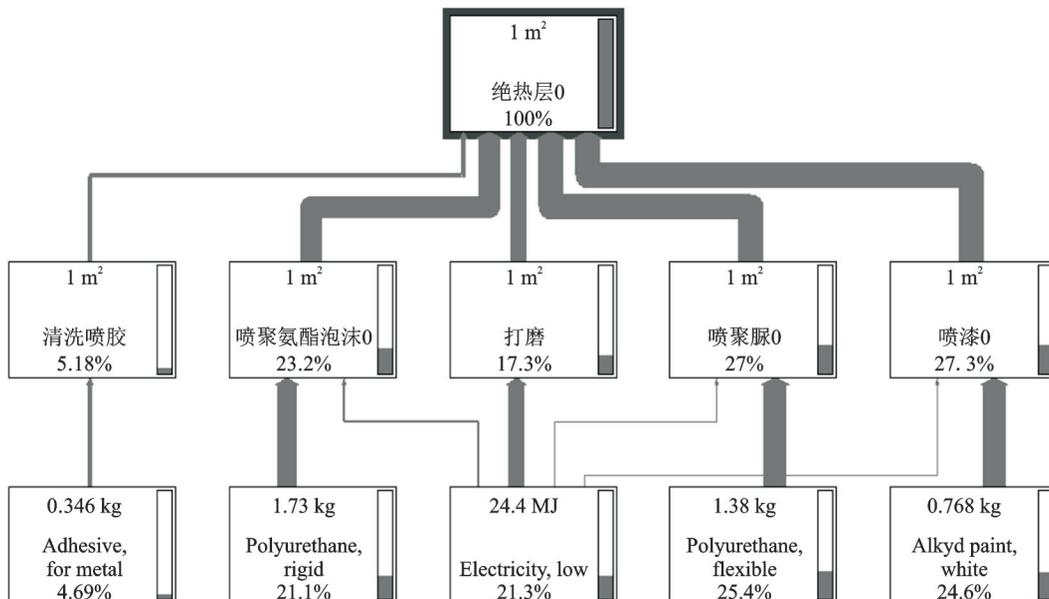


图3 绝热层制备工艺的 SimaPro 软件模型简图

Fig.3 SimaPro model of insulation layer preparation process

2 环境影响评价结果与分析

2.1 环境影响评价结果

对于全球变暖影响类别, 将制备 1 平方米绝热

层, 从原材料到加工过程中的资源、能源输入, 以及废气、废水、固体废物等环境排放输出的所有物质清单, 按照其各自对应的特征化因子, 分别转化为 CO₂ 当量数值并求和, 最终得到用 CO₂ 当量数值表

示潜在气候变化的特征化结果。对人类毒性影响类别,按照同样的方式进行特征化处理,最终以 1,4-DB 当量数值来表示人类毒性的特征化结果。其他 16 种影响类别都可以转化为各自对应的特征化当量物质。

但由于不同环境影响类别所使用的当量物质不同,因此其特征化结果之间不具备可比性。为了得到可比较的环境影响类别之间的关系,找出绝热层制备工艺中最大的潜在环境影响,将特征化结果进行标准化处理。最新的标准化基准仍然是不可用的,因此,本文选择 2000 年人均世界影响作为标准化基准,标准化结果为每种环境影响类别的结果与 2000 年人均世界影响结果之比^[27]。标准化结果以得分点 Pt(point)为单位,量纲化为一。图 4 给出了绝热层从原材料获取到制备过程中,18 种不同环境影响类别的最终标准化结果。

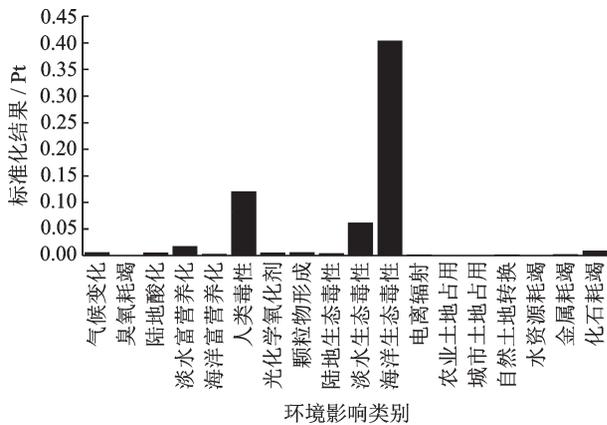


图 4 绝热层制备工艺标准化生命周期结果

Fig.4 Standardized life cycle results of insulation layer preparation process

可见,绝热层制备工艺(从原材料到加工过程)潜在的环境影响类别中,海洋生态毒性的环境影响最大,人类毒性、淡水生态毒性、淡水富营养化和化石耗竭 4 种环境影响类别依次有较大的贡献,然而气候变化、臭氧耗竭、陆地酸化、海洋富营养化、光化学氧化剂形成、颗粒物形成、陆地生态毒性、电离辐射、农业土地占用、城市土地占用、自然土地转换、水资源耗竭、金属耗竭等 13 种影响类别的贡献是较小的,可以忽略不计。

2.2 清单物质贡献分析

为了分析绝热层制备工艺中,整个过程的输入输出清单物质对海洋生态毒性、人类毒性、淡水生态毒性、淡水富营养化和化石耗竭这 5 种主要环境影响类别的贡献大小,对上述 5 种影响类别进行了贡献分析,结果如图 5 所示。对上述 5 种影响类别贡献最大的清单物质主要包括低温胶、聚氨酯组合

剂、聚脲组合剂、油漆和电能。其中,对于海洋生态毒性,聚氨酯、聚脲、油漆和电能有着相似的贡献,其贡献结果分别占海洋生态毒性总和的 21.2%, 25.3%, 24.6% 和 21.3%, 贡献最小的是低温胶, 占比为海洋生态毒性结果的 4.7%, 其他清单物质贡献为 2.9%; 对人类毒性, 油漆贡献了总结果的 35.2%, 占比最大, 低温胶的贡献最小, 仅为 3.3%; 对化石耗竭, 贡献最大的清单物质是聚氨酯, 占比 33.6%, 贡献最低的低温胶的比重为 6.0%; 对于淡水生态毒性和淡水富营养化, 贡献最大的清单物质均为电能, 分别贡献了 47.1% 和 32.2%, 贡献最低的同样为低温胶, 分别占 2.3% 和 2.0%。

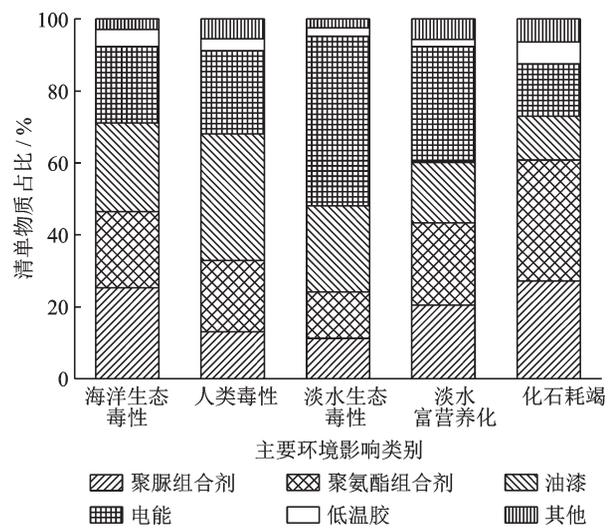


图 5 绝热层制备工艺清单物质贡献分析结果

Fig.5 List material contribution analysis results of insulation layer preparation process

显然,聚脲对海洋生态毒性的贡献最大,油漆对人类毒性的贡献最大,电能对淡水生态毒性和淡水富营养化影响类别的贡献最大,聚氨酯对化石耗竭的贡献最大。低温胶的贡献在上述 5 种主要的环境影响类别中都是最小的。

2.3 过程分析

图 6 给出了绝热层制备工艺中,清洗喷胶、喷聚氨酯泡沫、打磨、喷聚脲和喷漆 5 个过程的环境影响结果相对于总结果的占比情况。显然,对环境影响从大到小的依次是喷漆、喷聚脲、喷聚氨酯泡沫、打磨和清洗喷胶,其比重分别是 29.94%, 23.06%, 22.44%, 19.65% 和 4.91%。

2.4 敏感性分析

为了得到绝热层制备工艺环境影响类别结果相对于数据清单用量变化的情况,还对绝热层制备工艺进行了敏感性分析。结合数据清单贡献分析的结果,产生潜在环境影响较大的清单数据主要是聚氨酯组合剂、聚脲组合剂、油漆、电能和低温胶,

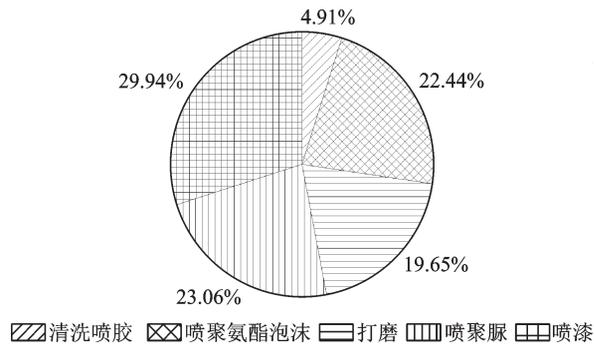


图6 绝热层制备工艺过程分析结果

Fig.6 Process analysis results of insulation layer preparation process

故分别减少上述5种物质5%的使用量(-5%),观察绝热层制备工艺总的环境影响变化,结果如表2所示。减少5%的聚氨酯用量可使海洋生态毒性

的1,4-DB当量排放降低2.88 kg,人类毒性的1,4-DB当量排放降低1.71 kg,淡水生态毒性当量排放降低1.78 g,淡水富营养化的P当量排放降低约0.05 g,化石耗竭的油当量排放降低0.17 kg。聚脲、油漆、电能和低温胶用量变化对应的结果分析可类比聚氨酯的分析得到。

特别地,海洋生态毒性的结果对油漆用量的改变最为敏感,其次是聚脲,海洋生态毒性对聚氨酯和电能的改变有着相似的敏感度,低温胶用量改变引起的海洋生态毒性结果最不明显。淡水生态毒性对电能的变化最为敏感,对低温胶的改变最不敏感。人类毒性和淡水富营养化均对油漆的改变最为敏感,其次是电能、聚氨酯和聚脲,对低温胶的改变最不敏感。化石耗竭对聚氨酯和聚脲的改变有着相似的敏感度,但同样对低温胶的改变最不敏感。

表2 主要清单数据的敏感性分析结果

Table 2 Sensitivity analysis results of main inventory data

清单物质	海洋生态毒性	人类毒性	淡水生态毒性	淡水富营养化	化石耗竭
	1,4-DB eq/kg	1,4-DB eq/kg	1,4-DB eq/g	P eq/g	oil eq/kg
聚氨酯(-5%)	2.88	1.71	1.78	4.97E-2	0.17
聚脲(-5%)	3.45	1.14	1.56	4.09E-2	0.14
油漆(-5%)	3.68	3.47	3.57	8.89E-2	8.85E-2
电能(-5%)	2.89	2.01	6.51	5.51E-2	7.41E-2
低温胶(-5%)	0.64	0.28	0.32	4.83E-3	3.08E-2

3 建 议

上述结果的分析表明,绝热层从原材料到制备工艺中,潜在环境影响最大的影响类别为海洋生态毒性、人类毒性、淡水生态毒性、淡水富营养化和化石耗竭。其中造成潜在环境影响贡献较大的清单物质分别是聚氨酯、聚脲、电能、油漆和低温胶。显然,这与聚氨酯泡沫喷涂过程中聚氨酯组合剂的使用、聚脲保护层喷涂过程中聚脲组合剂的使用、喷涂过程中油漆的使用、清洗喷胶过程中低温胶的使用,以及除清洗喷胶过程之外其他几个过程中电能的消耗有直接的关系。而上述5种物质产生的潜在环境影响主要来自材料的获取阶段。因此,为了降低绝热层制备工艺的环境影响,首先应在满足绝热层的功能要求的前提下,尽可能地选择更为环保的聚氨酯材料和聚脲材料,或用新型材料替代传统的聚氨酯、聚脲材料。其次在绝热层制备的设计阶段就应考虑好聚氨酯材料和聚脲材料的可再生回收方案,同时应做好工艺规划,避免聚氨酯材料和聚脲材料的过度浪费。

溶剂型油漆带来的环境影响不可忽视,因此喷

漆过程可以选择更为环保的粉末型漆料。考虑到粉末型漆料的喷漆过程会有颗粒物生成,可以在喷涂房间同时加装过滤装置;或者在喷涂车间使用活性炭对排放废气进行吸附处理,并使用催化氧化装置燃料处理,将浓缩的有毒、有害废气转化为无毒、无害物质排放。

另外,电能的消耗也是造成绝热层制备工艺环境影响的重要原因之一。因此,在绝热层制备过程中,考虑合理分配电能以及降低设备的耗电、提高电能的利用率,对降低绝热层制备工艺的环境影响也有积极作用。需要说明的是,由于煤炭在中国能源结构中起着重要的作用,选择火力发电作为本研究的背景数据,而煤炭开采所带来的环境影响是众所周知的,因此,选择水电、风电等清洁能源,提高清洁能源在火力发电中的比例,也能改善绝热层制备工艺的环境影响。

4 结 论

本文基于LCA方法对绝热层制备工艺从原材料到生产过程的环境影响进行了分析评价,得出的主要结论如下:

(1)绝热层制备工艺最大的潜在环境影响类别是海洋生态毒性,其次依次是人类毒性、淡水生态毒性、淡水富营养化和化石耗竭。

(2)对环境影响贡献较大的清单物质主要是聚氨酯、聚脲和油漆等材料,以及绝热层制备过程的电能消耗。其中,环境影响结果对油漆和电能的变化最为敏感,也即从上述两个方面对绝热层制备工艺进行改善的效果将最为明显。

(3)清洗喷胶、喷聚氨酯泡沫、打磨、喷聚脲和喷漆 5 个过程中,产生环境影响最大的过程是喷漆过程,接近总环境影响的 30%;聚脲喷涂过程和聚氨酯泡沫喷涂过程接近,占比分别为 23.06% 和 22.44%;其次是打磨过程,产生了 19.65% 的环境影响;清洗喷胶过程的环境影响最小,只有 4.91%。

(4)减少绝热层制备工艺的环境影响的措施主要有:采用较为环保的聚氨酯材料、聚脲材料和粉末型漆料;在设计阶段考虑聚氨酯废料和聚脲废料的回收利用;提高电能利用率和清洁能源使用率。

参考文献:

- [1] 郭兴旺,陈栋. 固体火箭发动机绝热层脱粘的红外热像检测规律[J]. 南京航空航天大学学报, 2017, 49(4): 487-495.
GUO Xingwang, CHEN Dong. Regularities of infrared thermography of disbands in insulator of solid rocket motors[J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, 2017, 49(4): 487-495.
- [2] 前瞻产业研究院. 2018 年聚氨酯行业发展现状与 2019 年行业发展前景分析[EB/OL]. (2018-12-20) [2019-07-06]. <https://www.qianzhan.com/analyst/detail/220/181220-1aba867f.html>.
- [3] HAUSCHILD M Z, ROSENBAUM R K, OLSEN S. Life cycle assessment[M]. Switzerland: Springer International Publishing AG, 2018.
- [4] KATZ S, LINDNER A S. A life-cycle comparison of several auxiliary blowing agents used for the manufacture of rigid polyurethane foam[J]. Journal of the Air & Waste Management Association, 2003, 53(4): 469-477.
- [5] BATOULI S M, ZHU Y, NAR M, et al. Environmental performance of kenaf-fiber reinforced polyurethane: A life cycle assessment approach[J]. Journal of Cleaner Production, 2014, 66(3): 164-173.
- [6] VON DER NIKLAS A, STERNBERG A, KÄTELHÖN A, et al. Environmental potential of carbon dioxide utilization in the polyurethane supply chain [J]. Faraday Discussions, 2015, 183: 291-307.
- [7] VON DER NIKLAS A, BARDOW A. Life cycle assessment of polyols for polyurethane production using CO₂ as feedstock: Insights from an industrial case study[J]. Green Chemistry, 2014, 16(6): 3272-3280.
- [8] PARGANA N, PINHEIRO M D, SILVESTRE J D, et al. Comparative environmental life cycle assessment of thermal insulation materials of buildings [J]. Energy and Buildings, 2014, 82: 466-481.
- [9] 马丽萍, 蒋荃, 赵平, 等. 我国典型建筑保温材料生产生命周期评价研究[J]. 新型建筑材料, 2013, 10: 41.
MA Liping, JIANG Quan, ZHAO Ping, et al. Life cycle assessment of typical building thermal insulation materials in China[J]. New Building Materials, 2013, 10: 41.
- [10] LA ROSA A D, RECCA G, SUMMERSCALES J, et al. Bio-based versus traditional polymer composites: A life cycle assessment perspective [J]. Journal of Cleaner Production, 2014, 74: 135-144.
- [11] 马丽萍, 蒋荃, 赵春芝. 我国典型硬泡聚氨酯板生命周期评价研究[J]. 化学工程与装备, 2013(1): 1-4.
MA Liping, JINAG Quan, ZHAO Chunzhi. Life cycle assessment of typical rigid foam polyurethane sheets in China[J]. Chemical Engineering and Equipment, 2013(1): 1-4.
- [12] MAZOR M H, MUTTON J D, RUSSELL D A M, et al. Life cycle greenhouse gas emissions reduction from rigid thermal insulation use in buildings[J]. Journal of Industrial Ecology, 2011, 15(2): 284-299.
- [13] HASAN A. Optimizing insulation thickness for buildings using life cycle cost [J]. Applied Energy, 1999, 63(2): 115-124.
- [14] YANG W, DONG Q, LIU S, et al. Recycling and disposal methods for polyurethane foam wastes [J]. Procedia Environmental Sciences, 2012, 16: 167-175.
- [15] WANG J, WANG R, ZHU Y, et al. Life cycle assessment and environmental cost accounting of coal-fired power generation in China [J]. Energy Policy, 2018, 115: 374-384.
- [16] Ecoinvent CENTRE. Swiss centre for life cycle inventories [EB/OL]. (2018-08-23). <https://www.ecoinvent.org/database/>.
- [17] 陈延平. 基于生命周期评价的集装箱喷涂工艺比较分析[D]. 大连: 大连理工大学, 2007.
CHEN Yanping. The comparison of varnishing techniques in container manufacturing based on LCA method [D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2007.
- [18] PAPASAVVA S, KIA S, CLAYA J, et al. Life cycle environmental assessment of paint processes [J]. Journal of Coatings Technology, 2002, 74(925):

- 65-76.
- [19] RIVERA J L, REYES-CARRILLO T. A life cycle assessment framework for the evaluation of automobile paint shops[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2016, 115: 75-87.
- [20] International Standards Organization. ISO 14040-06: Environmental management-life cycle assessment-general principles and framework[S]. Geneva, Switzerland: ISO, 2006.
- [21] International Standards Organization. ISO 14044-06: Environmental management-life cycle assessment-requirements and guidelines[S]. Geneva, Switzerland: ISO, 2006.
- [22] 吴建华, 金鹰, 姚振强. 汽车密封条可重构生产线全生命周期评估[J]. *南京航空航天大学学报*, 2005, 37(S1): 158-162.
- WU Jianhua, JIN Ying, YAO Zhenqiang. Life cycle assessment of reconfigurable manufacturing system for automobile weather strip[J]. *Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics*, 2005, 37(S1): 158-162.
- [23] GOEDKOOPE M, HEIJUNGS R, HUIJBREGTS M, et al. ReCiPe 2008: A life cycle impact assessment method which comprises harmonised category indicators at the midpoint and the endpoint level: VROM 2515 XP[R]. [S.l.]: [s.n.], 2009.
- [24] GOEDKOOPE M, SPRIENSMA R. The Eco-indicator99: A damage oriented method for life cycle impact assessment: Nr. 1999/36A[R]. [S.l.]: [s.n.], 2001.
- [25] GUINÉE J B. Handbook on life cycle assessment operational guide to the ISO standards[J]. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 2002, 7(5): 311-313.
- [26] Leiden University. The ReCiPe methodology for life cycle impact assessment (LCIA)[EB/OL]. (2011-06-16). <https://www.universiteitleiden.nl/en/research/research-projects/science/cml-recipe>.
- [27] SLEESWIJK A W, VAN OERS L F C M, GUINÉE J B, et al. Normalisation in product life cycle assessment: An LCA of the global and European economic systems in the year 2000[J]. *Science of the Total Environment*, 2008, 390(1): 227-240.

(编辑: 胥橙庭)