

儿童运动鞋生命周期评价的研究

刘海腾^{1,3}, 陈国栋^{1,3}, 丁伟^{1,3}, Robert Chen⁴, 庞晓燕^{1,2,3*}, 丁志文^{1,2,3}

- (1. 中国皮革制鞋研究院有限公司, 北京 100015;
2. 河北省绿色制革产业技术研究院, 河北 辛集 052360;
3. 中国轻工业皮革及制鞋绿色制造技术重点实验室, 北京 100015;
4. 德蒙福特大学, LE1 9BH, 英国, 莱斯特)

摘要:鞋类产品种类繁多、组织结构复杂、制造工艺流程繁琐,存在较多的资源浪费和环境污染的问题。采用生命周期评价方法科学合理地评价制鞋行业的环境影响因素,对制鞋厂生产过程提出清洁生产建议,有助于提高资源的利用率,减小对环境的负面影响,推进制鞋行业的可持续发展。本文采用 eFootprint 软件,选取气候变化(GWP)、一次能源消耗(PED)、非生物资源消耗潜值(ADP)等9个环境影响类型指标,对儿童运动鞋生产过程进行了环境影响评价,依据评价结果,提出了儿童运动鞋生产的绿色设计改进方案。

关键词:运动鞋;生命周期评价;环境影响

中图分类号 TS 94 文献标志码 A DOI:10.13536/j.cnki.issn1001-6813.2023-002-022

Study on Life Cycle Assessment of Children's Sports Shoes

LIU Hai-teng^{1,3}, CHEN Guo-dong^{1,3}, DING Wei^{1,3},
Robert Chen⁴, PANG Xiao-yan^{1,2,3*}, DING Zhi-wen^{1,2,3}

- (1. China Leather & Footwear Research Institute Co. Ltd., Beijing 100015, China;
2. Hebei Industrial Technology Research Institute for Green Manufacture of Leather, Xinji 052360, China;
3. Key Laboratory of Leather and Footwear Green Manufacturing Technology of China Light Industry, Beijing 100015, China;
4. De Montfort University, LE1 9BH, Leicester, UK)

Abstract: Footwear products have various styles, complicated organizational structure, complicated manufacturing process, and many problems of resource waste and environmental pollution. Life cycle assessment method was used to scientifically and reasonably evaluate the environmental impact factors of the footwear industry, and cleaner production suggestions were proposed for the production process of the footwear factory, which is helpful to improve the utilization rate of resources, reduce the negative impact on the environment, and promote the sustainable development of the footwear industry. The eFootprint software was used to evaluate the environmental impact of children's sports shoes production process by selecting 9 environmental impact type indicators, including climate change (GWP), primary

收稿日期:2022-12-05;修订日期:2023-01-05

基金项目:中国轻工集团有限公司软科学研究项目;高端外国专家引进计划项目(G2022056002)

第一作者简介:刘海腾(1986),女,硕士,高级工程师,liuhaiteng86@163.com,主要从事绿色化学品及功能材料的研发、绿色制造体系评价的工作。

*通信作者:庞晓燕(1980),女,博士,正高级工程师,pang_xiaoyan@126.com,主要从事功能皮革及鞋材的研究工作。

energy consumption (PED), and abiotic depletion potential (ADP). Based on the evaluation results, an improved green design scheme for children's sports shoes production was proposed.

Key words: sports shoes; life cycle assessment; environmental impact

引 言

我国是世界公认的鞋业生产大国、贸易大国、消费大国。随着制鞋行业的不断发展,对环境的影响日益增大,由于鞋类产品种类较多、组织结构复杂、制造工艺流程烦琐,存在着较多的资源浪费和环境污染的问题。

生命周期评价(Life Cycle Assessment, LCA)作为一种环境管理工具,不仅能对当前的环境冲突进行有效的定量分析和评价,而且能对产品及其“从摇篮到坟墓”的全过程所涉及的环境问题进行评价,是面向产品环境管理的重要支持工具。它既可用于企业产品开发与设计,又可以有效地支持政府环境管理部门制定相关环境政策,同时也可提供明确的产品环境标志来指导消费者的环境产品消费行为^[1]。将 LCA 用于鞋类产品生命周期评价,依据评价结果,对制鞋厂生产过程提出清洁生产建议,从而推动制鞋业生命周期评价的研究与应用,有助于提高资源的利用率,加强制鞋厂的环境管理,减小对环境的负面影响,推进制鞋行业的可持续发展。

本研究以福建某企业生产的一款儿童运动鞋(中童)为例,采用亿科生命周期环境评价与管理系统软件 eFootprint(以下简称 eFootprint 系统),选取气候变化(GWP)、一次能源消耗(PED)、非生物资源消耗潜值(ADP)、水资源消耗(WU)、酸化(AP)、富营养化

潜值(EP)、可吸入无机物(RI)、臭氧层消耗(ODP)、光化学臭氧合成(POFP)共 9 个环境影响类型指标,建立儿童运动鞋生命周期模型,并采用 eFootprint 内嵌的 CLCD-Q 方法^[2](定量评估并控制 LCA 数据质量的系统化方法)对其能源和环境效应进行定量评估,从能源和环境的角度为制鞋行业的发展政策制定提供依据。

1 儿童运动鞋产品生命周期评价

1.1 目标与范围定义

本研究的目标是建立一种儿童运动鞋产品的 LCA 模型,对其进行生命周期清单分析和影响评价,功能单位为 1 双儿童运动鞋。本研究的 LCA 系统边界属于“从摇篮到大门”的类型,鞋类产品生产主要包括鞋料划裁、帮底制作、帮底装配、成鞋整饰及包装 4 个过程^[3]。生命周期系统边界图如图 1 所示。

1.2 数据来源

本研究涉及的数据主要有以下 2 种。

(1)现场过程数据。主要包括儿童运动鞋加工过程及上游物料帮面和鞋底生产过程的物耗、能耗、产品输出和污染物排放数据,这类数据来自实地调研,对制鞋与制革企业进行现场信息收集和相关信息报告数据采集,同时辅助以咨询行业相关人员。

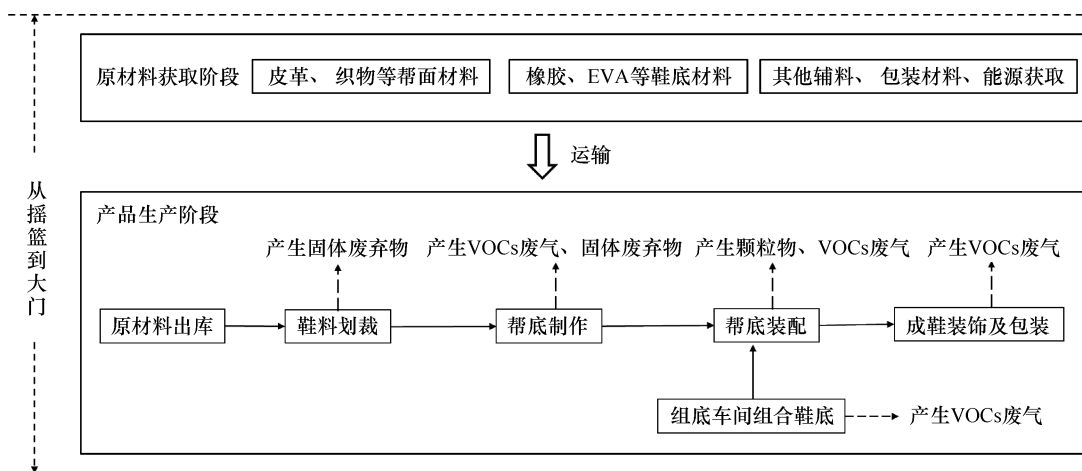


图 1 儿童运动鞋生命周期系统边界图

(2)上游背景数据。主要包括乙烯-醋酸乙烯酯共聚物(EVA)、胶黏剂、鞋盒生产,以及其他输入物质、能源(如电力等)的生产过程消耗和排放数据,通过结合文献和中国生命周期基础数据库(CLCD)获得。如果数据库中不存在某种物质的过程数据,则采用相似的工艺过程替代。

1.3 生命周期清单分析

清单分析基于物料平衡的理念,对生产过程中每个工序的输入输出数据进行收集。输入部分包括皮革、纺织面料、里衬、胶黏剂、包装材料、配件等的用量和能耗;输出部分包括产品的产量、固体废物及大气污染物的排放量。其中,产品包括每个单元过程的产品产量;污染物的排放量包括下脚料、废胶黏剂桶、废气。

本研究涉及儿童运动鞋的生产流程图如图2所示。

运动鞋生产鞋料剪裁、帮底制作、帮底装配、成鞋整饰及包装4个过程的数据清单分别如表1至表4所示。

1.4 生命周期影响评价

生命周期影响评价(Life Cycle Impact Assessment, LCIA)的目的是理解和评价一种产品或系统整个生命周期的潜在环境影响的大小和重要性^[4]。

表1 鞋料剪裁过程清单数据表

类型	清单名称	数量	单位
产品产出	鞋帮样片	1	双
原材料/物料	皮革	0.15	m ²
原材料/物料	纺织面料	0.5	m
原材料/物料	里衬	24	g
能源	电力	0.004 5	kWh
待处置废物	下脚料	11.93	g

表2 帮底制作过程清单数据表

类型	清单名称	数量	单位
产品产出	鞋帮	1	双
原材料/物料	缝纫线	4	g
原材料/物料	鞋带	6	g
能源	电力	0.005 1	kWh

表3 帮底装配过程清单数据表

类型	清单名称	数量	单位
产品产出	成鞋	1	双
原材料/物料	鞋底	1	双
原材料/物料	鞋垫	16	g
原材料/物料	胶黏剂	30.77	g
原材料/物料	清洁剂	0.41	g
能源	电力	0.01	kWh
环境排放	苯[排放到大气(未指定类型)]	9.47	ug
环境排放	甲苯[排放到大气(未指定类型)]	12.86	ug
待处置废物	废胶黏剂桶	0.43	g
待处置废物	废活性炭	76.92	mg

表4 成鞋整饰及包装过程清单数据表

类型	清单名称	数量	单位
产品产出	商品鞋	1	双
原材料/物料	鞋撑	1	双
原材料/物料	纸	6	g
原材料/物料	鞋盒	127	g

本研究选取的9个环境影响类型指标包括气候变化、一次能源消耗、非生物资源消耗潜值、水资源消耗、酸化、富营养化潜值、可吸入无机物、臭氧层消耗、光化学臭氧合成,如表5所示。

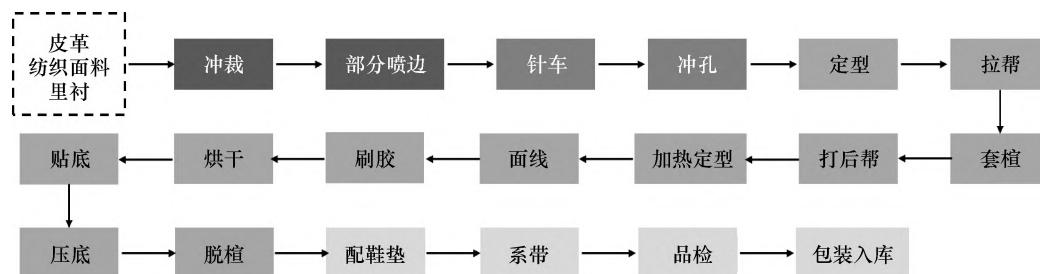


图2 运动鞋生产流程图

表 5 生命周期环境影响类型指标

环境影响类型指标	影响类型指标单位	主要清单物质
气候变化(GWP)	kg CO ₂ eq	CO ₂ , CH ₄ , N ₂ O...
一次能源消耗(PED)	MJ	硬煤, 褐煤, 天然气...
非生物资源消耗潜值 (ADP)	kg antimony eq.	铁, 锰, 铜...
水资源消耗(WU)	kg	淡水, 地表水, 地下水...
酸化(AP)	kg SO ₂ eq	SO ₂ , NO _x , NH ₃ ...
富营养化潜值(EP)	kg PO ₄₃ -eq	NH ₃ , NH ₄ -N, COD...
可吸入无机物(RI)	kg PM2.5 eq	CO, PM10, PM2.5
臭氧层消耗(ODP)	kg CFC-11 eq	CCl ₄ , C ₂ H ₃ Cl ₃ , CH ₃ Br...
光化学臭氧合成(POFP)	kg NMVOC eq	乙烷, 丙烷, 甲苯...

注: eq 是 equivalent 的缩写, 意为当量。

2 LCA 结果与分析

2.1 LCA 结果

采用 eFootprint 软件建模并计算 1 双儿童运动鞋的环境影响, 选取表 5 所示的 9 种计算指标, 计算结果如表 6 所示。

表 6 生产 1 双运动鞋的 LCA 结果

环境影响类型指标	影响类型指标单位	LCA 结果
GWP	kg CO ₂ eq	9.92
PED	MJ	222.74
ADP	kg antimony eq	5.53E-05
WU	kg	1 521.67
AP	kg SO ₂ eq	0.06
EP	kg PO ₄₃ -eq	0.16
RI	kg PM2.5 eq	0.02
ODP	kg CFC-11 eq	3.21E-07
POFP	kg NMVOC eq	0.01

2.2 环境影响类型指标分析

2.2.1 GWP 指标分析

全球变暖潜能值 (Global Warming Potential, GWP), 被称为“温室效应”, 是温室气体排放到大气中造成的环境影响^[5-6]。这些气体增加了地球的全球介质温度^[5,7], 温度的升高会导致多种影响生态系

统和人类健康的气候变化^[5]。

基于收集到的儿童运动鞋生产清单数据和 eFootprint 软件的辅助计算, 得到生产 1 双儿童运动鞋生命周期的 GWP 结果为 9.92 kg CO₂ eq。各过程中上游消耗生产对 GWP 的贡献如图 3 所示, 上游消耗生产对 GWP 贡献由大到小的过程分别是帮底装配工段鞋底的生产、鞋料划裁工段纺织面料的生产、鞋料划裁工段皮革的生产, 贡献率分别是 51.03%、29.56%、11.91%。

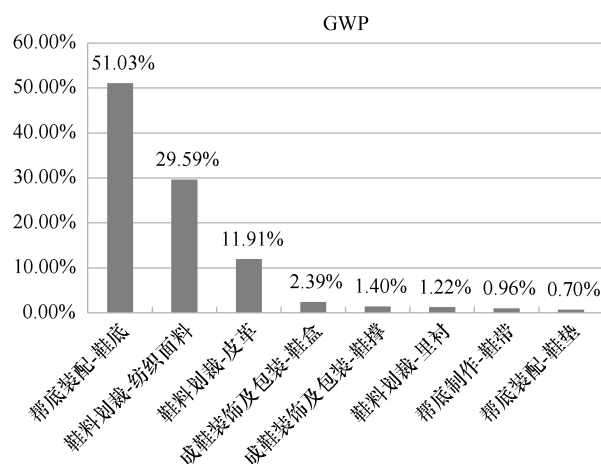


图 3 各过程中上游消耗生产对 GWP 的贡献
(仅列出各环境影响累计贡献>0.5%的清单)

2.2.2 PED 指标分析

一次能源 (Primary Energy), 即天然能源, 指在自然界现成存在的能源, 如煤炭、石油、天然气、水能等^[8]。二次能源指由一次能源加工转换而成的能源产品, 如电力、煤气、蒸汽及各种石油制品等。

儿童运动鞋、皮革、鞋底等生产过程使用的电力、蒸汽、天然气等二次能源, 通过引用 LCA 软件中电力、蒸汽、天然气等数据库数据, 计算得到生产 1 双儿童运动鞋生命周期的 PED 结果为 222.74 MJ。各过程中上游消耗生产对 PED 的贡献如图 4 所示, 上游消耗生产对 PED 贡献由大到小的过程分别是鞋料划裁工段纺织面料的生产、帮底装配工段鞋底的生产、鞋料划裁工段皮革的生产, 贡献率分别是 52.64%、31.79%、7.26%。

2.2.3 ADP 指标分析

非生物资源消耗潜值指标对应于生产使用的矿物和资源^[5]。这种消耗的影响是根据全球范围内矿物和资源的可用储量来估计的^[9]。这一影响指标分

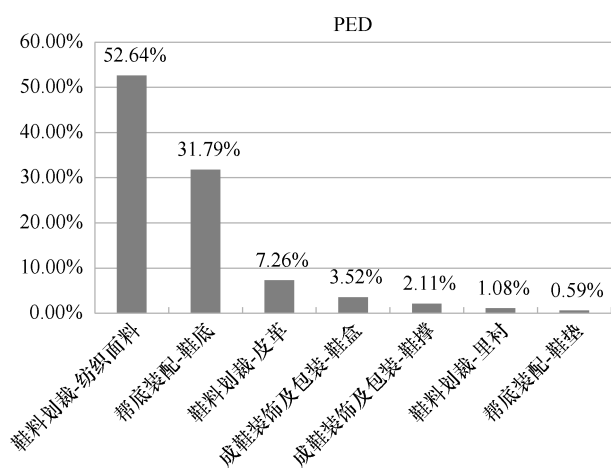


图4 各过程中上游消耗生产对 PED 的贡献
(仅列出各环境影响累计贡献>0.5%的清单)

为两个组成部分:材料组成部分和化石燃料组成部分。

儿童运动鞋生产过程对非生物资源消耗潜值的贡献主要来自自然资源的开采与使用,以及原辅材料的生产及运输等,例如天然气的开采、纺织面料与鞋底材料的生产等。基于收集到的儿童运动鞋生产清单数据和 eFootprint 软件的辅助计算,得到生产 1 双儿童运动鞋生命周期的 ADP 结果为 $5.53\text{E}-05 \text{ kg antimony eq.}$ 。各过程中上游消耗生产对 ADP 的贡献如图 5 所示,上游消耗生产对 ADP 贡献由大到小的过程分别是鞋料划裁工段纺织面料的生产、帮底装配工段鞋底的生产、鞋料划裁工段皮革的生产,贡献率分别是 49.90%、36.99%、7.44%。

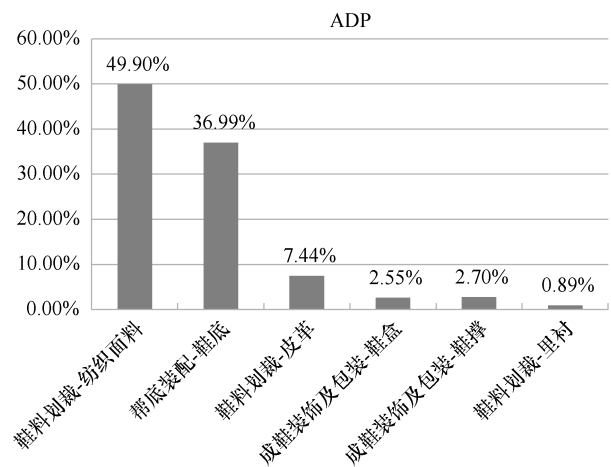


图5 各过程中上游消耗生产对 ADP 的贡献
(仅列出各环境影响累计贡献>0.5%的清单)

2.2.4 WU 指标分析

童鞋、皮革、鞋底等生产过程使用的工业用水,通过引用 eFootprint 软件中工业用水数据库数据,计算得到生产 1 双儿童运动鞋生命周期的 WU 结果为 1 521.67 kg。各过程中上游消耗生产对 WU 的贡献如图 6 所示,上游消耗生产对 WU 贡献由大到小的过程分别是帮底装配工段鞋底的生产、鞋料划裁工段皮革的生产,贡献率分别是 71.13%、24.13%。

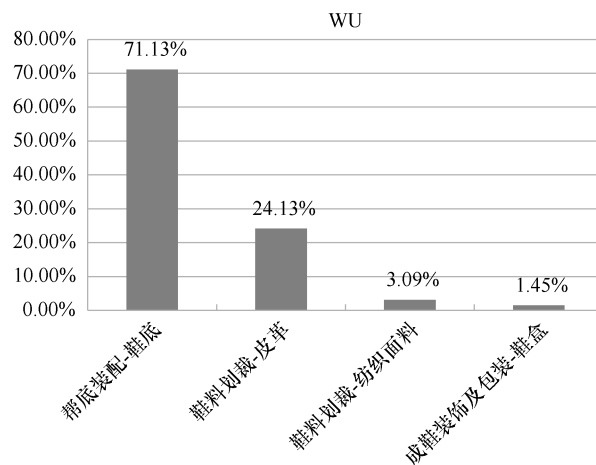


图6 各过程中上游消耗生产对 WU 的贡献
(仅列出各环境影响累计贡献>0.5%的清单)

2.2.5 AP 指标分析

酸化潜值是对导致土壤、地面和地表水酸化,对动物、生态系统和建筑环境产生影响的气体数量进行量化的环境影响^[10]。导致酸化的主要气体是二氧化硫(SO_2)、氧化亚氮(NO_x)和还原氮(NH_x)^[5-6]。

基于收集到的儿童运动鞋生产清单数据和 eFootprint 软件的辅助计算,得到生产 1 双儿童运动鞋生命周期的 AP 结果为 $0.06 \text{ kg SO}_2 \text{ eq.}$ 。各过程中上游消耗生产对 AP 的贡献如图 7 所示,上游消耗生产对 AP 贡献由大到小的过程分别是帮底装配工段鞋底的生产、鞋料划裁工段纺织面料的生产、鞋料划裁工段皮革的生产,贡献率分别是 45.48%、38.43%、12.66%。

2.2.6 EP 指标分析

儿童运动鞋生产过程对富营养化潜值的贡献主要来自原辅材料的生产产生的工业废水,如皮革、纺织面料生产产生的工业废水。

基于收集到的儿童运动鞋生产清单数据和 eFootprint 软件的辅助计算,得到生产 1 双儿童运动

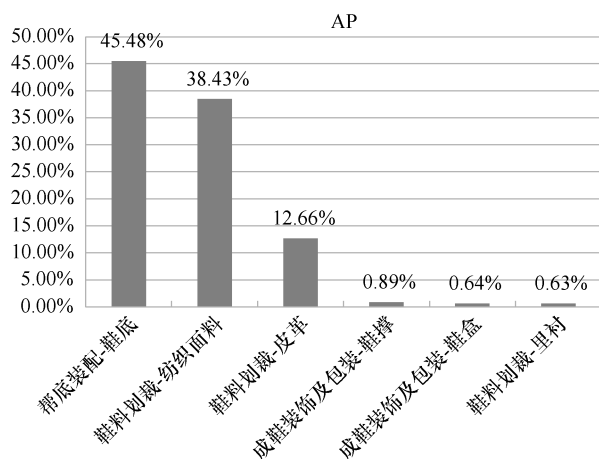


图7 各过程中上游消耗生产对AP的贡献
(仅列出各环境影响累计贡献>0.5%的清单)

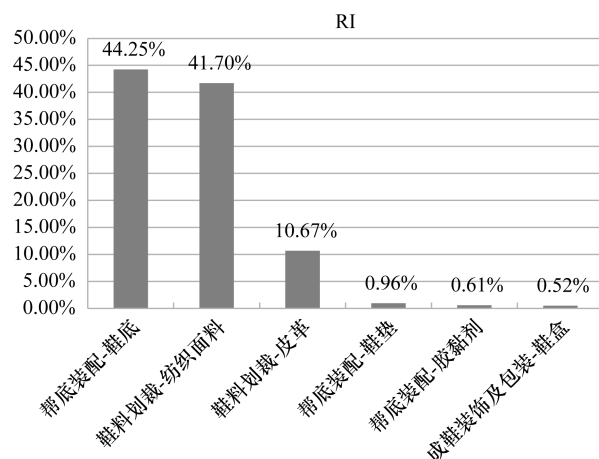


图9 各过程中上游消耗生产对RI的贡献
(仅列出各环境影响累计贡献>0.5%的清单)

鞋生命周期的EP结果为0.16 kg $\text{PO}_{43}\text{-eq}$ 。各过程中上游消耗生产对EP的贡献如图8所示,上游消耗生产对EP贡献最大的过程分别是鞋料划裁工段纺织面料的生产,贡献率是96.81%。

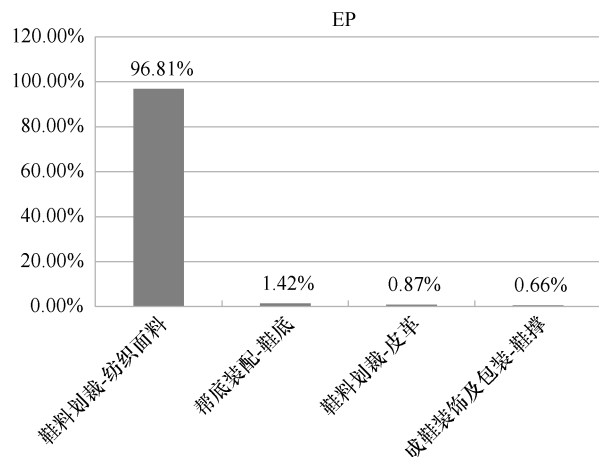


图8 各过程中上游消耗生产对EP的贡献
(仅列出各环境影响累计贡献>0.5%的清单)

2.2.7 RI 指标分析

儿童运动鞋生产过程对可吸入无机物的贡献主要来自童鞋及原辅材料生产的环境排放。基于收集到的儿童运动鞋生产清单数据和 eFootprint 软件的辅助计算,得到生产1双儿童运动鞋生命周期的RI结果为0.02 kg $\text{PM}_{2.5}\text{eq}$ 。各过程中上游消耗生产对RI的贡献如图9所示,上游消耗生产对RI贡献由大到小的过程分别是帮底装配工段鞋底的生产、鞋料划裁工段纺织面料的生产、鞋料划裁工段皮革的生产,贡献率分别是44.25%、41.70%、10.67%。

2.2.8 ODP 指标分析

臭氧消耗潜值是指在稳态条件下,单位质量的某种气体在大气中引起的臭氧总量变化量相对于单位质量的三氯氟甲烷(CFC-11,或简称R-11)在大气中引起的臭氧总量变化量的比值。

儿童运动鞋生产过程对臭氧层消耗潜值的贡献主要来自原辅材料的生产,如橡胶、EVA等。基于收集到的儿童运动鞋生产清单数据和 eFootprint 软件的辅助计算,得到生产1双儿童运动鞋生命周期的ODP结果为3.21E-07 kg CFC-11 eq。各过程中上游消耗生产对ODP的贡献如图10所示,上游消耗生产对ODP贡献由大到小的过程分别是帮底装配工段鞋底的生产、鞋料划裁工段纺织面料的生产,贡献率分别是49.52%、39.62%。

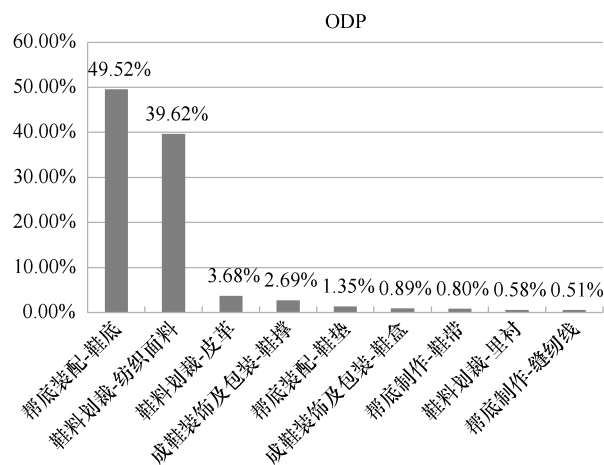


图10 各过程中上游消耗生产对ODP的贡献
(仅列出各环境影响累计贡献>0.5%的清单)

2.2.9 POFP 指标分析

光化学臭氧合成指标表征不同挥发性有机物 (VOCs) 物种生成臭氧的潜能,是综合衡量 VOCs 物种的反应活性对臭氧生成的指标参数。可用来分析不同排放源 VOCs 物种对环境空气中臭氧的潜在贡献,确定重点 VOCs 控制源。

儿童运动鞋生产过程对光化学臭氧合成潜值的贡献主要来自儿童运动鞋及原辅材料的生产过程中的环境排放。基于收集到的儿童运动鞋生产清单数据和 eFootprint 软件的辅助计算,得到生产 1 双儿童运动鞋生命周期的 POFP 结果为 0.01 kg NMVOC eq。各过程中上游消耗生产对 POFP 的贡献如图 11 所示,上游消耗生产对 POFP 贡献由大到小的过程分别是鞋料划裁工段纺织面料的生产、帮底装配工段鞋底的生产、鞋料划裁工段皮革的生产,贡献率分别是 40.49%、36.65%、12.98%。

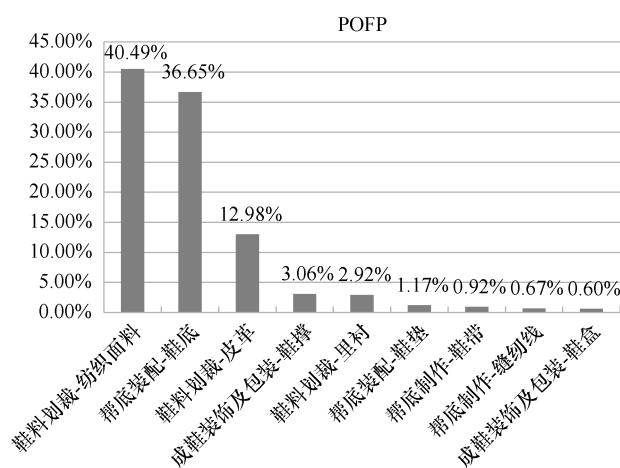


图 11 各过程中上游消耗生产对 POFP 的贡献
(仅列出各环境影响累计贡献>0.5%的清单)

2.3 绿色设计改进方案

根据“2.2 环境影响类型指标分析”可知,鞋料划裁和帮底装配过程是儿童运动鞋生命周期过程中对各资源环境指标贡献最大的过程,表明这些过程是实现儿童运动鞋绿色改进的重要环节。为了更直观展现儿童运动鞋生命周期各过程中上游消耗生产对产品环境影响类型的贡献,如图 12 所示。

由图 12 可见,鞋料划裁工段纺织面料的生产消耗与帮底装配工段鞋底的生产消耗对各指标贡献最大;鞋料划裁工段皮革的生产消耗对各指标贡献较

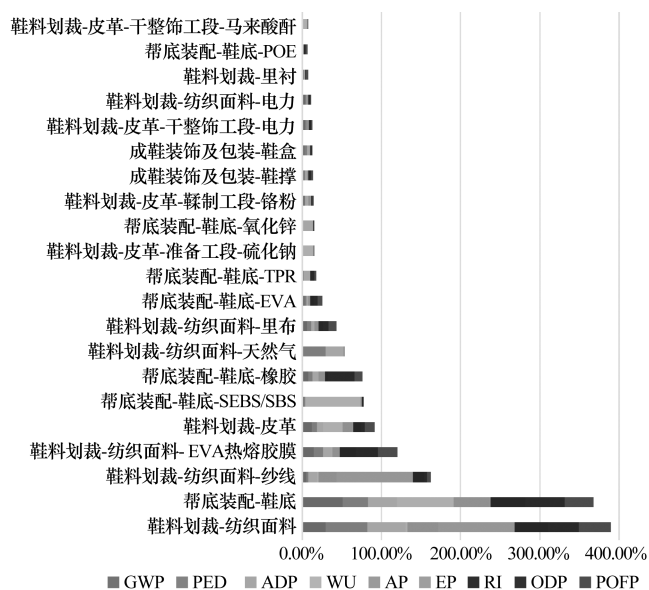


图 12 各过程中上游消耗生产对环境影响类型的贡献
(仅列出各环境影响累计贡献>0.5%的清单)

大。因此,鞋料划裁工段纺织面料生产中纱线、EVA 热熔胶膜、天然气、里布、电力的使用,帮底装配工段鞋底生产中电力、热塑性丁苯橡胶 (SEBS/SBS)、橡胶、乙烯-醋酸乙烯酯共聚物 (EVA)、热塑性橡胶材料 (TPR)、氧化锌、聚烯烃弹性体 (POE) 的使用,鞋料划裁工段皮革生产中硫化钠、铬粉、电力、马来酸酐的使用,是儿童运动鞋生命周期绿色改进的重点过程。

(1) 对鞋料划裁工段中纺织面料生产过程,企业应通过使用节能通用设备、使用光伏发电、选用低能耗少污染的材料等措施,以减小产品生命周期环境影响结果。

(2) 对于帮底装配工段中鞋底生产过程,企业应通过使用节能通用设备、增加环保材料的使用占比等措施,以减小电力、原材料的使用对产品生命周期环境影响结果。

(3) 对于鞋料划裁工段中皮革生产过程,企业应通过使用节能通用设备、使用光伏发电、采用少铬鞣或无铬鞣工艺替代铬鞣工艺、采用无硫低硫保毛脱毛工艺、提高浸灰废液循环利用率、增加废水处理回用率等措施,以减小电力、原材料的使用对产品生命周期环境影响结果。

(4) 对于儿童运动鞋生产过程,企业应通过使用节能设备,使用有机棉、可回收聚酯、环保橡胶等环保

(下转第 116 页)

很好的推广应用前景。

参考文献:

- [1] 花金岭,方应森,程凤侠.制革废液循环使用研究现状[J].皮革科学与工程,2009,19(4):55-59.
- [2] 李闻欣,刘晨茜,强西怀,等.铬鞣废液封闭循环工艺操作液特征分析及效益评估[J].中国皮革,2017,46(11):1-6.
- [3] 丁绍兰,马飞,吕志鹏.绵羊皮制革浸酸废液絮凝-微滤处理及循环使用的研究[J].中国皮革,2019,48(3):28-33,37.
- [4] 王未肖,哈婧,李朝阳.铬鞣废液直接循环利用技术的研究与应用[J].河北大学学报(自然科学版),2010,30(4):389-393.
- [5] 胡书祥,周建,张文华.铬鞣废液处理的研究现状与发展趋势[J].西部皮革,2011,33(6):31-35.
- [6] Esmaili A, Mesdaghi A, Vazirinejad R. Chromium (Ⅲ) removal and recovery from tannery waste water by precipitation-process[J]. American Journal of Applied Sciences, 2005, 2(10): 1 471-1 473.

- [7] 李闻欣.皮革环保工程概论[M].北京:中国轻工业出版社,2015:8-10.
- [8] Silambarasan S, Aravindhan R, Raghava R J. 石永固,编译.限制铬鞣过程中的用水量[J].西部皮革,2015,37(16):51-54.
- [9] 李闻欣,惠田甜,韩茜,等.宝斯卡铬鞣废液循环鞣制的牛蓝湿革特征研究[J].中国皮革,2018,47(6):40-66.
- [10] 郑国经.电感耦合等离子体发射光谱分析仪器与方法的新进展[J].冶金分析,2014,34(11):1-10.
- [11] 黄海兰,王鑫,法芸,等.离子色谱法测定蓝藻培养液中有機酸和无机阴离子[J].分析科学学报,2017,33(1):32-36.
- [12] CJ/T57-1999 城市污水 油的测定 重量法[S].
- [13] 罗晓民,丁绍兰,周庆芳.皮革理化分析[M].北京:中国轻工业出版社,2013.
- [14] Bianca M, Ana C G, Mariliz G. Removal of chromium from tanning wastewater and its reuse[J]. Process Safety and Environmental Protection, 2015, 95: 195-201.

(上接第 107 页)

材料,选择鞋材时考虑所选鞋材在制备过程中的环保因素等措施,以减小电力、鞋材等的使用对产品生命周期环境影响结果。

3 结 论

采用 eFootprint 软件建立儿童运动鞋生命周期模型,并进行生命周期清单分析和影响评价。依据生命周期评价结果,儿童运动鞋生命周期对环境影响的贡献主要来自上游物料——鞋底、纺织面料、皮革的生产过程。对 GWP、AP、RI 贡献程度依次为鞋底>纺织面料>皮革;对 PED、ADP、POFP 贡献程度依次为纺织面料>鞋底>皮革;对 WU 贡献程度依次为鞋底>皮革;对 EP 贡献主要是纺织面料的使用,贡献率达 96.81%;对 ODP 贡献程度依次为鞋底>纺织面料。依据上述评价结果,对制鞋厂生产过程提出清洁生产建议,推动制鞋业生命周期评价的研究与应用,有助于提高资源的利用率,加强制鞋厂的环境管理,减小对环境的负面影响,推进制鞋行业的可持续发展。

参考文献:

- [1] 郑秀君,胡彬.我国生命周期评价(LCA)文献综述及国外最新研究进展[J].科学进步与对策,2013,30(6):155-160.

- [2] 黄娜,王洪涛,范辞冬,等.基于不确定度和敏感度分析的 LCA 数据质量评估与控制方法[J].环境科学学报,2012,32(6):1 529-1 536.
- [3] T/CNLC XXXX-XXXX,《绿色设计产品评价技术规范 鞋类》(报批稿)[S].
- [4] ISO14044. Environmental management—life cycle assessment—requirements and guidelines [S]. 2006.
- [5] Silvestre J D. Life cycle assessment “from cradle to cradle” of building assemblies – Application to external walls [D]. Instituto Superior Técnico. Portugal. PhD thesis in Civil Engineering, 2012.
- [6] Kurda R. Sustainable development of cement-based materials: Application to recycled aggregates concrete [D]. Instituto Superior Técnico. Universidade de Lisboa. PhD thesis in Civil Engineering, 2017.
- [7] C. B. Farinha, J. Silvestre, J. De Brito, et al. Life cycle assessment of mortars with incorporation of industrial wastes[J]. Fibers, 2019, 7(7):1-19.
- [8] 张志英,鲁嘉华.新能源与节能技术[M].北京:清华大学出版社,2013.
- [9] G. A. Blengini. Life cycle assessment tools for sustainable development: case studies for the mining and construction industries in Italy and Portugal [D]. Instituto Superior Técnico. Universidade de Lisboa. PhD thesis in Mining Engineering, 2006.
- [10] U. S. Environmental Protection Agency (EPA), “Life cycle assessment: Principles and practice” [R]. 2006.