

基于生命周期评价法模型的 废旧轮胎翻新环境效益评价

盛俊栋¹, 马涛^{1, 2*}

(1. 复旦大学, 上海 200433; 2. 复旦大学国土资源经济研究中心, 上海 200433)

摘要: 对废旧轮胎进行翻新是减少资源消耗和环境污染, 促进产业循环经济发展的重要手段。本文选择全钢巨胎为研究对象评价了废旧轮胎翻新的环境效益。研究发现, 在全钢巨胎生产过程中, 原材料投入是环境影响的主要来源。如果按全球平均水平(6.00%)进行翻新, 环境总影响将减少4.20%, 而按照北美平均水平(47.00%)进行翻新, 环境总影响将减少32.90%。这表明, 在全钢工程轮胎生产中引入废旧轮胎回收工艺具有较强的环境友好性。鉴于目前我国对废旧轮胎翻新的重视不足, 本研究还给出了相应的政策建议。

关键词: 废旧轮胎; 全钢巨胎; 回收翻新; 生命周期评价; 环境效益

中图分类号: X705 文献标志码: A 文章编号: 1006-5377 (2024) 05-0066-05

在中国汽车工业迅速发展的当下, 废旧轮胎的数量急剧增加, 给环境治理带来新挑战^[1]。由于轮胎主要由耐腐蚀、难以自然分解的橡胶材料构成, 废旧轮胎的处理成为了轮胎行业亟须解决的重大课题。因此, 探索废旧轮胎的高效资源化途径并量化分析其综合效益成为解决这一问题的关键。目前, 国内外的学者和企业也在不断探寻不同废旧轮胎资源化利用方法的环境效益。

从历史上看, 回收橡胶的技术已经被广泛应用于轮胎、橡胶板和胶带等产品的生产中。然而, 近几年来, 有研究指出, 在再生橡胶生产过程中涉及的动态脱硫步骤会释放出大量有害气体, 如硫化氢和二氧化硫, 从而会导致严重的大气污染^[2]。

对于热解法的环境效益, 有学者探讨了通过热裂解废旧轮胎得到的轮胎衍生油(TDO)与柴油混合, 提取高价值化学品, 显著提升了废轮胎热裂解的经济性能, 同时产生具有市场竞争力的燃料产品^[3]。

除了再生橡胶及热解法外, 废旧轮胎热能利用的环境及经济效益也得到广泛关注。相关数据显示, 与等重量的传统燃料相比, 退役轮胎单位重量的热值超出木材69%、焦炭4%^[4]。

在各类资源化利用方法中, 轮胎翻新的环境和经济效益得到了国际范围内的广泛认可。具体来说, 一条废旧轮胎的原料消耗量仅为制造一条新轮胎所需原料量的15%至30%, 而其成本则仅为新轮胎价格的30%至60%^[5]。这些数据不仅凸显了翻新轮胎在延长使用期限和提高成本效益方面的重要性, 也强调了其在资源利用效率和经济可持续性方面的积极影响。

因此, 本文选择了废旧轮胎回收翻新为研究对象, 并选择了翻新利用程度较高、具有市场代表性的全钢巨胎作为切入点, 参考生命周期理论的研究思路构建了生命周期评价法(LCA)模型, 使用中点法对废旧轮胎回收翻新的环境影响贡献进行计算和对比分析。

1 研究对象和数据来源

1.1 研究对象

本研究通过对现有的废旧轮胎资源化利用方式进

收稿日期: 2024-03-16; 修回日期: 2024-05-07

第一作者简介: 盛俊栋(1999—), 男, 上海人, 硕士, 主要从事资源再生利用的环境经济评价研究工作。

* 通讯作者: 马涛

行预筛选，选择具有研究价值、研究可行性及市场认可度较高的废旧轮胎回收翻新进行研究。

1.2 数据来源

(1) 实地调研对象选取

目前全球化的废旧轮胎回收翻新主要运用于机械化轮胎中，主要为巨型工程子午线轮胎，即全钢巨胎，该类型轮胎具有较大的市场规模，具有一定的行业代表性。为了更准确地获取研究数据，本研究挑选福建某全钢巨胎生产企业作为主要调研对象。

(2) 实地调研数据获取

对于实地调研企业，本研究获取并查阅了该企业的环境评价报告、收入成本表、生产车间的原料投入物料清单表（BOM表）、员工发薪明细等底层数据，确保了所获信息的准确性。

(3) 结合废旧轮胎回收翻新的全钢巨胎生产线数据模拟

为充分展现废旧轮胎回收翻新的环境及经济效益，本研究以现有的研究成果以及实地调研企业的现有生产及经营数据为基础，模拟了全球平均废旧轮胎翻新率（6%）及北美平均废旧轮胎翻新率（47%）的全钢巨胎生产线生产及经营数据。

2 废旧轮胎回收翻新 LCA 模型构建

LCA 通过定量化分析产品或过程在整个生命周期内的物质流动和能量流动，系统地计算并评估其对环境的影响^[6]。LCA 旨在为研究者提供一个科学和直观的手段，以了解和评估产品或服务在生态维护、能源利用和人类健康等方面的环境负担^[7]。

国际标准化组织（ISO）已经制定了一套完整的 LCA 研究方法标准，主要包括四个基本步骤：目标和范围定义、生命周

期清单分析（LCI）、生命周期影响评价（LCIA）和结果解释^[8]。这一流程旨在确保评价结果的科学性、一致性和可对比性，为决策者在环境管理中提供可靠的参考。

2.1 系统边界和功能单位

系统边界将界定研究系统内产生的所有物质流入及物质输出，因此中间产物不在研究范围内。结合废旧轮胎回收翻新的全钢巨胎生产线的具体系统边界如图 1 所示，虚线内为本研究的系统边界。

通过对福建某企业的实地调研，本研究将生产一条 49.00R57 规格的全钢巨胎所产生的环境影响设定为 1 功能单位。

2.2 清单分析

结合废旧轮胎翻新工艺的全钢巨胎生产线的原材料投入主要为天然橡胶、炭黑及钢帘线。生产线的原材料投入量及运行耗电量来自企业提供的运行数据与相关文献的经验数据，均折算为 1 功能单位并加入数据清单。

废弃物排放参考调研企业的环境影响评价报告。轮胎生产的废弃物排放主要为生产废水，污染物包括 COD、BOD₅、SS 等。废弃物间接造成的温室气体排放等主要来自发电、原材料投入等过程，其环境影响由 Simapro 内置全球数据库获取。

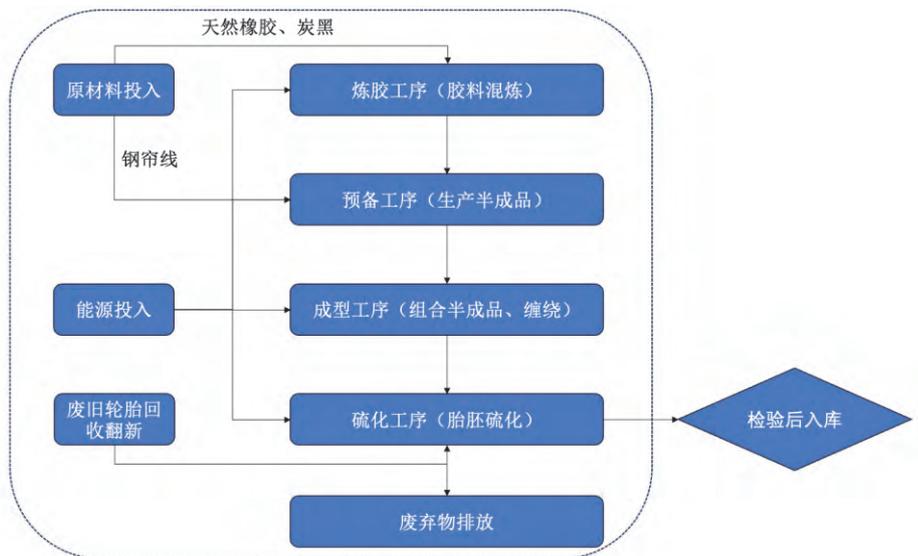


图 1 结合废旧轮胎回收翻新的全钢巨胎生产线系统边界图

3 LCA 模型评价结果

本研究使用了 Simapro 9.3 软件，基于目标范围、系统边界、功能单位和数据清单的确定，使用 Recipe 2016 Midpoint (H) 评价方法对三种不同废旧轮胎回收利用程度的全钢工程轮胎生产线进行了环境影响分析。

首先，对技术方案整体环境影响进行分析。使用 Simapro 9.3 软件对 18 种环境影响类型进行特征化分析，得到每种技术方案对 18 种环境影响类型的特征化结果，分析得到的特征化结果如表 1 所示。

通过详细分析表 1 数据可知，全钢巨型子午线轮胎生产线对环境带来的主要影响集中在陆地生态毒性、全球变暖和化石资源稀缺这三个方面。值得注意的是，全钢工程轮胎生产过程中产生的陆地生态毒性影响是最为突出的环境影响因素。全球变暖和化石资源稀缺影响相对显著，居于第二和第三位。而其他的

15 种环境影响类型则占有较小的比例，不到 5%，显示出相对较低的显著性。

在特征化结果的基础上，对表 1 数据进行无量纲化处理，即标准化处理后，综合对比全球平均翻新率（6%）与北美平均翻新率（47%）下的环境总影响变化情况，可以发现全球平均翻新率下的生产将会使环境总影响减少约 4.20%，而按照平均北美翻新率进行生产时，环境总影响将会显著减少 32.90%。这一对比明显表明，在全钢工程轮胎的生产过程中融入废旧轮胎的回收加工工艺，将极大地提升该产业的环境友好性。

其次，对全钢巨型轮胎生产过程进行物质流分析中。该过程可以细化为三个主要部分：原材料的输入、能源的消耗，以及污染物的排放。以回收翻新率为 6% 的全钢巨胎生产线为例，全钢巨胎生产线物质流环境影响占比情况如表 2 所示。

表 1 环境影响特征化结果对比

环境影响类型	单位	生产一条 49.00R57 全钢工程轮胎 (不回收翻新)	生产一条 49.00R57 全钢工程轮胎 (回收翻新 6%)	生产一条 49.00R57 全钢工程轮胎 (回收翻新 47%)
全球变暖	kg CO ₂ eq	3308.10	3169.16	2219.73
平流层臭氧消耗	kg CFC ₁₁ eq	-	-	-
电离辐射	kBq Co ₆₀ eq	38.27	36.66	25.68
臭氧形成 / 人类健康	kg NO _x eq	7.60	7.28	5.10
细颗粒物的形成	kg PM _{2.5} eq	5.31	5.09	3.56
臭氧形成 / 陆地生态系统	kg NO _x eq	8.08	7.74	5.42
陆地酸化	kg SO ₂ eq	12.13	11.62	8.14
淡水富营养化	kg P eq	0.56	0.54	0.38
海洋富营养化	kg N eq	0.08	0.07	0.05
陆地生态毒性	kg 1,4-DCB	8875.97	8503.18	5955.78
淡水生态毒性	kg 1,4-DCB	3.59	3.44	2.41
海洋生态毒性	kg 1,4-DCB	11.10	10.63	7.45
人类致癌毒性	kg 1,4-DCB	41.18	39.45	27.63
人体非致癌毒性	kg 1,4-DCB	669.04	640.94	448.93
土地使用	m ² a crop eq	125.22	119.96	84.02
矿产资源短缺	kg Cu eq	27.38	26.23	18.37
化石资源稀缺	kg oil eq	2040.27	1954.57	1369.02
水资源消耗	m ³	28.71	27.50	19.26
标准化处理后的环境总影响变动	%	-	4.20	32.90

表 2 全钢巨胎生产线物质流环境影响占比

环境影响类型	单位	原材料投入占比	能源投入占比	污染物处理占比
全球变暖	kg CO ₂ eq	99.60%	0.29%	0.11%
平流层臭氧消耗	kg CFC ₁₁ eq	99.20%	0.14%	0.66%
电离辐射	kBq Co ₆₀ eq	99.92%	0.04%	0.05%
臭氧形成 / 人类健康	kg NO _x eq	99.48%	0.35%	0.18%
细颗粒物的形成	kg PM _{2.5} eq	99.53%	0.27%	0.20%
臭氧形成 / 陆地生态系统	kg NO _x eq	99.50%	0.33%	0.17%
陆地酸化	kg SO ₂ eq	99.52%	0.27%	0.21%
淡水富营养化	kg P eq	97.26%	0.04%	2.70%
海洋富营养化	kg N eq	47.45%	0.03%	52.53%
陆地生态毒性	kg 1,4-DCB	99.71%	0.06%	0.23%
淡水生态毒性	kg 1,4-DCB	98.02%	0.06%	1.92%
海洋生态毒性	kg 1,4-DCB	99.01%	0.05%	0.94%
人类致癌毒性	kg 1,4-DCB	98.49%	0.13%	1.38%
人体非致癌毒性	kg 1,4-DCB	97.20%	0.28%	2.52%
土地使用	m ² a crop eq	99.76%	0.09%	0.16%
矿产资源短缺	kg Cu eq	99.76%	0.01%	0.23%
化石资源短缺	kg oil eq	99.87%	0.09%	0.04%
水资源消耗	m ³	120.46%	0.07%	-20.54%

由表 2 可知，全钢巨胎生产的物质流中，生产阶段的原材料投入是其环境影响的主要来源，除海洋富营养化外，原材料投入的影响占比均高于 95%。因此，综合考虑物质流对于环境的影响程度重要性以及基于上述技术方案生命周期的环境影响特征值显著性，在对三种不同废旧轮胎回收利用程度的全钢巨胎生产工艺进行评价时，重点考虑天然橡胶、炭黑及钢帘线

帘线的投入对于全球变暖、陆地生态毒性以及化石资源稀缺三方面的影响程度。

天然橡胶、炭黑及钢帘线的投入对于全球变暖，陆地生态毒性及化石资源稀缺的影响情况如图 2 所示。由图 2 可以看出，对于上述三种环境影响类型，天然橡胶投入的影响占比均为最高，其次为炭黑投入，最后为钢帘线投入。考虑到全钢巨胎生产中，天然橡胶系最为重要的原材料，占比达 70% 以上，因此三种原材料投入的环境影响占比与其投入量间呈现匹配关系。

此外，天然橡胶投入对陆地生态毒性的影响占比显著高于其对全球变暖及化石资源稀缺的影响占比。炭黑投入对于化学资源稀缺的影响占比则高于其对全球变暖及陆地生态毒性的影响占比。钢帘线对于全球变暖的影响占比高，对于陆地生态毒性的影响占比则较低。

4 结论及工艺优化建议

4.1 结论

通过比较三种不同翻新率的全钢巨胎生产线的环 境总影响变化可以看到，按全球平均翻新程度（6.00%）进行生产，环境总影响将减少约 4.20%，而按照北美平均翻新程度（47.00%）进行生产，环境总影响将减少约 32.90%。这表明，在全钢工程轮胎生产中引入废旧轮胎回收工艺具有较强的环境友好性。

而在全钢巨胎生产的物质流中，生产阶段的原材料投入是其环境影响的主要来源。其中，天然橡胶投

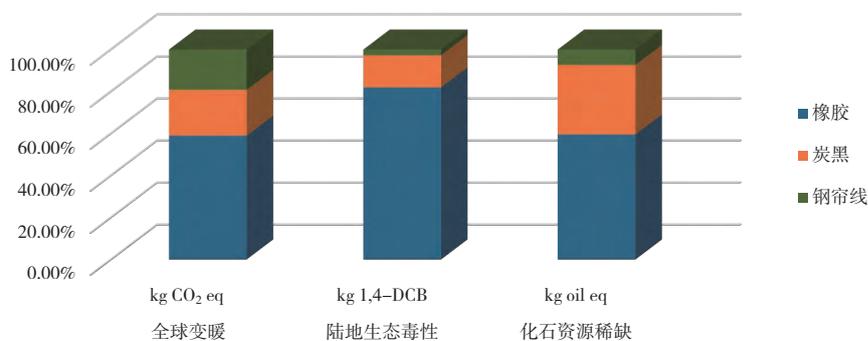


图 2 各原材料投入对全球变暖、陆地生态毒性以及化石资源稀缺的影响占比

入对陆地生态毒性的影响占比显著高于其对全球变暖及化石资源稀缺的影响占比。炭黑投入对于化学资源稀缺的影响占比则高于其对全球变暖及陆地生态毒性的影响占比。钢帘线对于全球变暖的影响占比较高,对于陆地生态毒性的影响占比则较低。

4.2 建议

(1) 随着我国轮胎行业的快速发展,我国应当借鉴国外经验,建立生产者扩展责任制度,让轮胎生产企业的生产责任进一步延伸。

(2) 政府应增加对废旧轮胎回收翻新研发的财政投入,鼓励和支持高校、研究机构与企业之间的合作,共同研究和开发新的轮胎翻新技术及工艺。

(3) 针对前期企业主动参与废旧轮胎翻新的积极性不高、技术探索期可能存在负经济效益的情形,政府应出台相应的财政税收政策,通过税收减免、财政补贴等手段,鼓励企业参与废旧轮胎的回收和翻新工作。

(4) 应当加强与国际组织和国外翻新轮胎行业的合作与交流,引进国际先进的翻新技术、管理经验和标准体系。✍

参考文献:

- [1] 曹卫东,王超,韩恒春.废旧轮胎在道路工程中的应用综述[J].交通标准化,2005(6):78-82.
- [2] FAZULLINA A A, RYAPISOVA L V, FRIDLAND S V. Features of reaction of dimethylhydrazine with salicylic aldehyde[J]. Russian Journal of General Chemistry, 2011, 81(2): 437-438.
- [3] FARZAD S, MANDEGARI M, GÖRGENS J F. A novel approach for valorization of waste tires into chemical and fuel (limonene and diesel) through pyrolysis: Process development and techno economic analysis [J]. Fuel Processing Technology, 2021(224): 107006.
- [4] 陆永其.国外废橡胶资源的利用概况[J].再生资源研究,2005(1):16-19.
- [5] 韩向雨,岳燕祥,雷黎,等.汽车轮胎翻新经济效益分析[J].中国资源综合利用,2007,25(5):19-21.
- [6] 卢艳玲,周素涓,高新南.基于LCA和Ecotect的塑料连栋温室节能优化研究[J].科学技术创新,2022(21):179-182.
- [7] 胡晓芬.资源型工业园区循环化改造多维测度及路径优化策略[D].兰州:兰州大学,2017.
- [8] MUSHTAQ M H, NOOR F, MUJTABA M A, et al. Environmental performance of alternative hospital waste management strategies using life Cycle assessment (LCA) Approach [J]. Sustainability, 2022, 14(22): 14942.

Environmental Benefit Assessment of End-of-Life Tire Refurbishment Based on the Life Cycle Assessment (LCA) Model

SHENG Jun-dong¹, MA Tao^{1,2*}

(1. Fudan University, Shanghai 200433;

2. Center for Land and Resources Economy, Fudan University, Shanghai 200433, China)

Abstract: This paper selects radial off-the-road (OTR) tires as the subject of study and evaluate the environmental benefits of the tire refurbishment process. The study reveals that, in the production cycle of radial OTR tires, the major sources of environmental impact are the input of raw materials. If tire refurbishing were conducted at the global average rate of 6.00%, the total environmental impact would be reduced by 4.20%. Conversely, if conducted at the North American rate of 47.00%, the reduction in environmental impact could reach 32.90%. This suggests that integrating used tire recycling processes into the production of radial OTR tires has significant environmental advantages. Given the inadequate attention to tire refurbishment in China, the study further provides pertinent policy recommendations.

Key words: end-of-life tires; radial off-the-road (OTR) tires; recycling and refurbishment; life cycle assessment; environmental benefits