

基于 LCA 的铸造静压造型线环境影响分析

郑孟超¹, 吴进军², 袁 骏¹, 李晶莹², 王 营², 朱宇宏²

(1. 机械科学研究总院集团有限公司, 北京 100044; 2. 中机生产力促进中心, 北京 100044)

摘要: 为综合评估铸造静压造型生产线制造过程对环境的影响, 以某型号铸造静压造型生产线为研究对象, 基于生命周期评价方法构建了评价模型, 重点结合其典型结构及生产工艺过程, 对静压造型线产品制造的气候变化指标 (GWP)、初级能源消耗 (PED) 与水资源消耗 (WU) 进行了计算分析。结果表明, GWP、PED、WU 指标分别为 8.7286×10^5 kg CO₂ eq., 1.105×10^7 MJ, 2.56×10^6 kg H₂O; 静压造型生产线研制过程各部件的环境影响水平与其部件重量呈正相关性, 对环境影响贡献率最高为砂箱台车; 对GWP指标优化降低最有效部件为静压线主机, 对PED指标优化降低最有效部件为液压系统, 对WU指标优化改进最有效部件为钢结构。研究表明, 典型机电装备的轻量化设计、选用更为清洁低耗生产的原材料、采用更为节能的加工工艺是降低其环境影响指标的主要路径。

关键词: 生命周期评价; 环境影响; 静压造型生产线

目前, 环境问题广受社会各界关注, 随之而来的是绿色制造浪潮在世界各国范围内兴起^[1]。绿色制造关注产品全生命过程对环境的影响, 而对此较常用的方法之一是生命周期评价 (Life Cycle Assessment, LCA)。LCA是一种用于分析产品、工艺或活动, 从原材料获取到产品生产、贮存、运输、使用、维护、回收和最终处置整个生命周期有关的环境负荷、能源及水资源消耗评估^[2]。

LCA的典型评价过程, 需依据评价方法, 建立实际模型, 采集数据并进行评价分析。

静压造型工艺是铸造行业常用的工艺之一, 主要流程包括配砂-制芯-造型-熔炼以及浇注-落砂-铸件清理-旧砂回收处理等, 是一种大规模铸造生产工艺^[3]。本文选取某型号的伺服全自动静压造型生产线作为研究对象, 根据其结构特点及各部件特征, 基于LCA典型评价方法, 依据生命周期评价模型, 采集静压造型生产线研制各阶段的能耗、排放清单, 对其环境影响进行分析, 分析结果可以为铸锻装备优化设计、生产制造过程绿色化提升提供依据。

1 评价方法

生命周期评价的开展, 需首先明确技术路线、系统边界、评价指标^[4]。

1.1 技术路线

当前, 由于铸造装备产品个性化、制造离散型的等特点, 相关产品的资源、能源、环境影响的定量化评价研究较少^[5]。本文旨在基于生命周期评价方法, 研究静压造型生产线形成完整产品交付前的排放、物料资源与能源消耗等情况, 并分析其环境总体影响及改善优化路径。技术路线图如图1所示。

1.2 系统边界

基于静压造型生产线实际研制过程与数据可得性, 文中系统边界选取“从摇篮

作者简介:

郑孟超 (1996-), 男, 硕士, 主要研究方向为先进制造装备。E-mail: mrzhmch@163.com

通讯作者:

吴进军, 男, 研究员。E-mail: jinjun_wu@163.com

中图分类号: TG2

文献标识码: A

文章编号: 1001-4977 (2021) 08-0958-06

收稿日期:

2021-01-22

到大门”类型，“摇篮”代表原材料、零部件、分系统等基础性产品的诞生，“大门”是整机产品制成出厂^[6]，即重点关注从造型线原材料-零部件-子系统-集成制造-整机产品出厂交付等环节（由于造型线具体制造产品的不同，文中暂不考虑出厂后使用等环节）。研究范围主要涵盖从铁矿石开采、冶炼、毛坯件生产、到部件精加工、组装完成生产线的全部阶段，其生命周期主要环节和系统边界如图2。

1.3 评价指标

生命周期评价数据主要来源于以下两部分：一是背景过程数据，如电力、钢铁冶炼、原材料运输消耗等数据，这部分主要来源于背景基础数据库^[7]；二是实景过程数据，如加工、组装过程能耗、排放等数据，这主要来源于对企业生产各过程的消耗与排放的调研统计。

研究选取了气候变化（Climate Change, GWP），初级能源消耗（Primary Energy Demand, PED），水资源消耗（Resource Depletion-water, WU）等3项评价指标^[8]。指标计量单位见表1（eq.为equivalent的缩写，意为当量）。

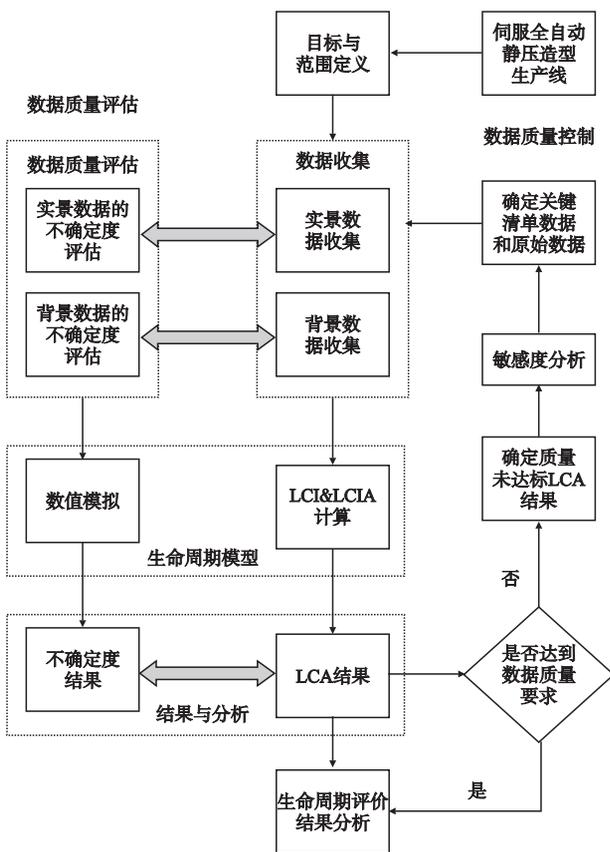


图1 技术路线图
Fig. 1 Technology road map

2 模型构建

本文所引背景过程数据集为中国生命周期核心数据库（CLCD）^[9]，实景过程数据来源于整机生产线研发制造企业及主要零部件外协加工商。

2.1 背景过程

背景过程数据为评价对象涉及的行业原料及零部件产品相关LCA基础数据，一般直接通过LCA上溯权威数据库直接获得。该静压造型生产线背景过程如表2。

2.2 实景过程

实景过程为整机产线制造企业及主要部件外协加工商在工业生产过程中，使用行业原料、基础产品等生产所需最终产品的过程，数据需进行实地调研采集。同时实景过程最终需要追溯到背景过程，从而覆盖目标产品的原材料及成品加工等的生命周期过程。实景过程数据根据研究对象的不同构成及生产制造过程维度进行相应划分。基于静压造型线生产制造主要环节，同时考虑数据可得性及相对准确性，文中实景过程主要如表3。

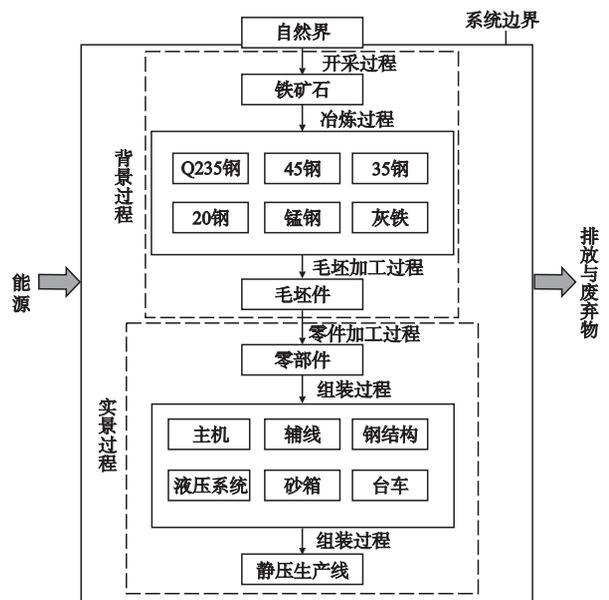


图2 静压造型生产线系统边界图
Fig. 2 System boundary diagram of hydrostatic molding production line

表1 环境影响类型指标
Table 1 Environmental impact type index

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...
初级能源消耗 (PED)	MJ	硬煤, 原油, 天然气...
水资源消耗 (WU)	kg	淡水, 地表水, 地下水...

表2 背景过程数据清单
Table 2 Background process data list

过程	主要输入		主要输出	
	原材料	能源及辅料	主要产品	主要污染
资源开采过程	-	燃料、电力等	铁矿石等	废气、废水等
冶炼过程	铁矿石	电力、煤、天然气、焦炭、液化气、转炉煤气、蒸汽等	钢锭、连铸钢等	CO ₂ 、CO、NO _x 、SO ₂ 、废水等
毛坯加工过程	钢锭、连铸钢	电力等	型钢、钢板、钢管等	废气、废水等
运输过程	-	柴油等	-	废气等

表3 实景过程数据清单
Table 3 Real process data list

过程	主要输入		主要输出	
	原材料	能源及辅料	主要产品	主要污染
主机加工过程(主要包含铸造、焊接、机加工、喷漆等过程)	Q235、45、35、20钢、不锈钢、锰钢、20Cr、40Cr、OCr13、QT450-10、ZG350等	电力、机油、焊条、油漆、切屑液、刀具等	静压造型机主机部分	废气、废水、固体废弃物等
辅线加工过程(主要包含焊接、机加工等过程)	Q235、45、35、20钢、锰钢、50Qb等	电力、机油、焊条、油漆、切屑液、刀具等	冷却车、插箱机、轨道系统、翻转机、内壁清理机、台面清扫机、铣浇口机、钻气孔机、造型段边滚架、锁箱钩、分箱推送缸、分箱机、分箱转运车、合箱过渡车、型板更换装置等	废气、废水、固体废弃物等
钢结构加工过程(主要包含切割、焊接等过程)	4 mm扁豆花纹钢板、5#槽钢、10#槽钢、14#槽钢、圆钢、角钢50 mm×50 mm×5 mm、焊接钢管、彩钢板、扁钢、H型钢等	电力、油漆、焊条、乙炔、氧气等	连接、支撑钢板等	废气、废水、固体废弃物等
砂箱台车加工过程(主要包含铸造、喷漆等过程)	45钢、QT、HT、固化剂、硫铁等	水、机油、油漆、切削液、刀具、孕育剂、增碳剂、除渣剂等	砂箱与台车等	废气、废水、固体废弃物等
液压系统加工过程(主要包含机加工、切割等过程)	35钢、液化油等	电力、乙炔、氧气等	液压阀块、液压站等	废气、废水、固体废弃物等
组装过程	-	电力等	-	-

2.3 模型构建

静压造型线的生产涉及基础材料、零部件的加工、装配等的过程，属于典型的离散制造。针对静压造型生产线主要功能组成及实际生产过程，将数据清单划分为静压造型主机、辅线、砂箱台车、钢结构、液压系统等5个子系统，并适当考虑组装、交通运输等环节，进行生命周期LCA模型构建。具体评价模型示意图如图3所示。

3 测算分析

3.1 生命周期评价指标测算

基于LCA评价方法静压造型生产线的某项指标的

环境影响评价计算价值计算方法如下：

$$ER_j = \sum ER_{j,s} = \sum (Q_{i,j,s} \times EF_{i,j})_s \quad (1)$$

式中： ER_j 为第 j 项指标评价结果， $ER_{j,s}$ 为第 s 过程第 j 项指标评价结果， $Q_{i,j,s}$ 为第 i 种物质或能量在第 s 过程在第 j 项指标的排放或消耗量， $EF_{i,j}$ 为第 i 种物质对第 j 种指标环境影响的当量因子^[10]。

综合考虑上述过程数据、实景过程数据，经测算，静压造型生产线研制过程中共产生 8.7286×10^5 kg二氧化碳当量温室气体排放，初级能源消耗 1.105×10^7 MJ，产生 2.56×10^6 kg水资源消耗。静压造型生产线研制过程所造成的环境影响，在GWP指标上，以人均年二氧化碳排放量8 t计，大致约为一个普通家庭36年的二氧

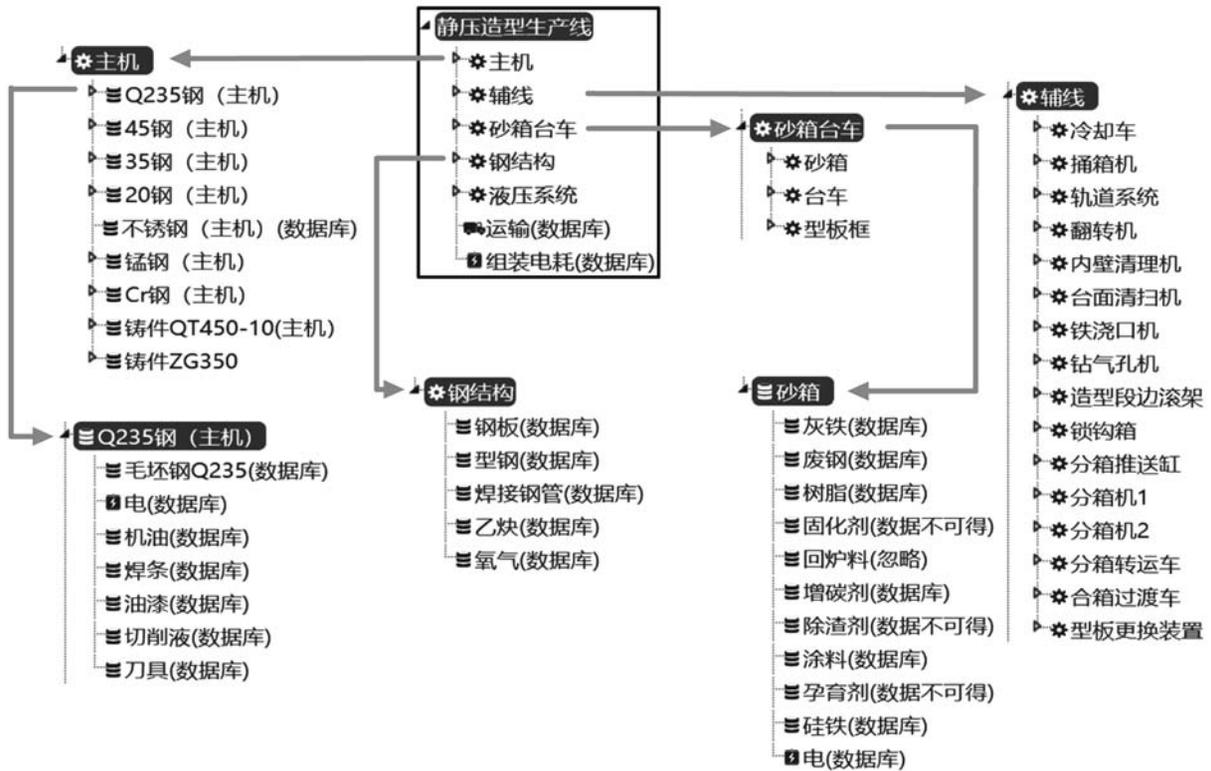


图3 生命周期评价模型部分示意图

Fig. 3 Schematic diagram of life cycle assessment model

化碳排放量；在PED指标上，以人均一次能源消费量96.9 GJ计，大致约为一个普通家庭38年的一次能源消耗量；在WU指标上，以城镇人均生活用水量225 L/d计，大致约为一个普通家庭10年的水消耗量。生命周期各部分评价测算数据如图4所示。

3.2 贡献率分析

该静压造型线研制过程中各部件所产生的GWP、PED与WU指标贡献率如图5所示。从GWP、PED、WU三个评价指标不同维度看：在GWP指标贡献率方面，砂箱台车部分最高，占比52.96%，辅线部分占17.30%，主机部分占10.80%，钢结构部分占9.70%；在PED指标贡献率方面，砂箱台车部分最高，占比53.43%，辅线部分占15.87%，钢结构部分占10.10%，主机部分占9.94%；在WU指标贡献率方面，砂箱台车部分最高占51.16%，钢结构部分占18.08%，辅线部分占14.10%，主机部分占8.79%。

经计算，静压线构成各主要部件重量占比从多到少分别为：砂箱台车部分占总重量62.20%，辅线部分占14.04%，钢结构部分占10.44%，主机部分占9.30%，液压系统部分占4.01%。如图6所示，各部分在三个指标上的贡献率基本与其占总重量的比重呈现较强的正相关性，即各部分指标贡献率与其重量占比基本保持

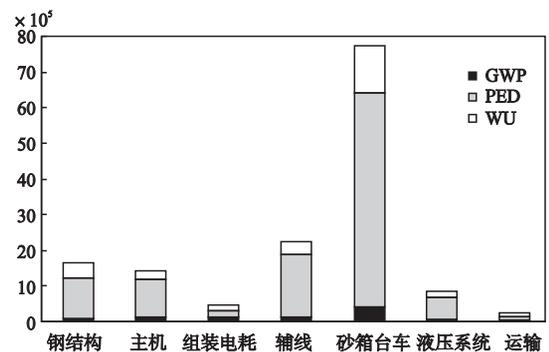


图4 生命周期评价测算数据

Fig. 4 Life cycle assessment data

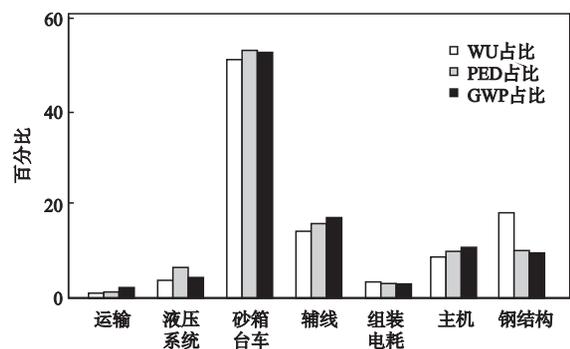


图5 各部件指标贡献率

Fig. 5 Contribution rate of each component index

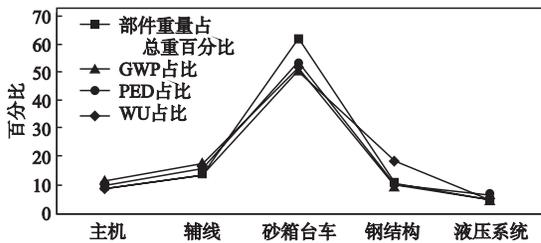


图6 部件重量占比与部件各指标贡献率关系图

Fig. 6 Relationship between weight proportion of components and contribution rate of each index of components

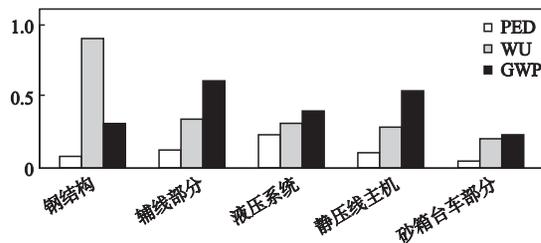


图7 不同部件环境影响数据清单灵敏度表

Fig. 7 Sensitivity table of environmental impact data list for different components

一致。其中，钢结构在WU指标贡献率上偏高，是因为相较于其他部分所需的原材料，钢铁原材料不仅在其冶炼生产过程大量消耗水，同时冶炼过程中所需的能源（乙炔、氧气）在生产过程均需要消耗水资源。砂箱台车部分重量占比与指标贡献率出现了一定偏差，是因为砂箱制造过程中使用较多的是生铁，相较其他Q235、45钢等，生铁的冶炼单位能耗较少。

3.3 灵敏度分析

清单数据灵敏度是指清单数据单位所能引起的相应指标变化^[11]。通过分析清单数据对各指标的灵敏度（图7），可以辨识针对各指标最有效的改进方向，为静压造型生产线设计及制造过程优化，降低对环境的影响提供依据^[12]。

灵敏度可由下式计算得出：

$$S_{ij} = Y_i / X_j \quad (2)$$

$$R_{ij} = (S_{ij} - \text{Min Value}) / (\text{Max Value} - \text{Min Value}) \quad (3)$$

式中： Y_i 代表第*i*种环境影响评价指标结果值， X_j 代表第*j*种清单数据值， S_{ij} 为特征化结果， R_{ij} 为归一化结果， R_{ij} 即为第*j*种清单数据对第*i*种环境影响评价指标的灵敏

度^[13]。

从GWP、PED、WU三项评价指标灵敏度的维度可得出以下结果。

在GWP指标方面，主机与辅线部分灵敏度分别为0.59与0.52，较其他部件灵敏度较高，主要是由于主机与辅线部分制造过程中，综合使用原材料为锰钢、Cr钢、不锈钢等，在原材料制造上单位碳排放相对较高，同时，加工制造过程包含复杂结构及铸造、焊接、机加工等多种高能耗制造工序，因而集中体现在GWP指标灵敏度较高。在PED指标灵敏度方面，液压系统灵敏度为0.23，较其他部件灵敏度偏高。主要因为液压系统的制造过程中使用了大量的液压油，这需消耗大量原油制取。原油是不可再生能源，是对PED指标具有较大影响的直接贡献能源，原油的消耗造成液压系统在PED指标上有较高的灵敏度。在WU指标方面，钢结构的指标灵敏度为0.88，较其他部件灵敏度偏高。钢结构在静压造型线中主要起连接与支撑作用，主要原材料为大量型钢，型钢在制造过程中本身便具有较高的单位水资源消耗；在后期加工过程中，对型钢进行了大量的切割和焊接处理，使用了较多的乙炔、氧气、焊条等，乙炔与氧气对于WU指标灵敏度也具有较高的贡献。这两个过程综合造成了钢结构在WU指标上较高的灵敏度。

从灵敏度角度维度分析来看，GWP指标的降低以静压线主机与辅线各部件的轻量化改造最为有效，PED指标的改善需从液压系统的液压部件替代方面入手，WU指标的改善从钢结构的使用、加工角度考虑最为有效。

4 结论

基于生命周期评价方法（LCA），本文对某型号铸造静压造型生产线进行了环境影响分析。选取了GWP、PED、WU三项指标进行测算，分析得出：静压造型生产线研制过程各部件的环境影响水平与其部件重量呈正相关性，对三项指标结果最灵敏的部件分别为静压线主机、液压系统和钢结构。研究表明，典型机电装备的轻量化设计、选用更为清洁低耗生产的原材料、采用更为节能的加工工艺是降低其环境影响指标的主要途径。

参考文献：

- [1] 谭俊, 陈建敏, 刘敏, 等. 面向绿色制造与再制造的表面工程 [J]. 机械工程学报, 2011, 47 (20): 95-103.
- [2] 张丛光, 邱凌, 王飞, 等. 基于LCA的黄土高原沼气生态果园环境影响研究 [J]. 农业环境科学学报, 2018, 37 (4): 833-840.
- [3] 赵春, 马书宇, 邓浩然, 等. 国产静压造型线的分类与发展 [J]. 中国铸造装备与技术, 2019, 54 (4): 92-95.
- [4] 殷仁述, 杨沿平, 杨阳, 等. 车用钛酸锂电池生命周期评价 [J]. 中国环境科学, 2018, 38 (6): 2371-2381.

- [5] 彭飞, 杨沿平, 殷仁述, 等. 商用车铝合金与钢制轮辋生命周期环境影响评价对比分析 [J]. 环境科学学报, 2015, 35 (12): 4136-4142.
- [6] GB/T 24044-2008环境管理: 生命周期评价要求与指南 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2008.
- [7] 郑晓云, 徐金秀. 基于LCA的装配式建筑全生命周期碳排放研究——以重庆市某轻钢装配式集成别墅为例 [J]. 建筑经济, 2019, 40 (1): 107-111.
- [8] 郑汉东, 陈意, 李恩重, 等. 再制造产品服务系统生命周期评价建模及应用 [J]. 中国机械工程, 2018, 29 (18): 2197-2203.
- [9] 刘夏璐, 王洪涛, 陈建, 等. 中国生命周期参考数据库的建立方法与基础模型 [J]. 环境科学学报, 2010, 30 (10): 2136-2144.
- [10] 杨建新, 王如松, 刘晶茹. 中国产品生命周期影响评价方法研究 [J]. 环境科学学报, 2001 (2): 234-237.
- [11] 刘飞, 李聪波, 曹华军, 等. 基于产品生命周期主线的绿色制造技术内涵及技术体系框架 [J]. 机械工程学报, 2009, 45 (12): 115-120.
- [12] 李梦婷. 折叠纸盒的生命周期评价研究 [D]. 北京: 北京印刷学院, 2019.
- [13] 马艳, 李方义, 王黎明, 等. 基于多层次数据分配的机床生命周期环境影响评价 [J/OL]. 计算机集成制造系统: 1-22 [2020-12-28]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.5946.TP.20200414.1350.004.html>.

Environmental Impact Assessment of Casting Hydrostatic Pressure Molding Lines Based on Life Cycle Assessment

ZHENG Meng-chao¹, WU Jin-jun¹, YUAN Jun¹, LI Jing-ying², WANG Ying², ZHU Yu-hong²

(1. China Academy of Machinery Science and Technology Group Co., Ltd., Beijing 100044, China; 2. China Productivity Center for Machinery, Beijing 100044, China)

Abstract:

In order to comprehensively evaluate the impact of the manufacturing process of the casting hydrostatic pressure molding lines on the environment, this paper takes a certain type of hydrostatic pressure lines as the research object, and constructs an evaluation model based on the life cycle assessment (LCA). Combining with its typical structure and production process, the climate change (GWP), primary energy demand (PED) and resource depletion-water (WU) of the hydrostatic pressure lines are analyzed. The results illustrate that the calculation results of the GWP, PED, and WU indicators are 8.7286×10^5 kg CO₂ eq., 1.105×10^7 MJ, 2.56×10^6 kg H₂O, respectively. The environmental impact level of each component in the development process of hydrostatic pressure lines is positively correlated with its component weight, and the highest contribution rate of environmental impact is sand box trolley. The hydrostatic line main engine is the most effective component to reduce the GWP index, the hydraulic system is the most effective component to reduce the PED index, and the steel structure is the most effective component to optimize and improve the WU index. The research shows that the main ways to reduce the environmental impact index of mechanical and electrical equipment are the lightweight design of typical mechanical and electrical equipment, the selection of cleaner raw materials and the use of more energy saving processing technology.

Key words:

life cycle assessment; environmental impact; hydrostatic pressure lines