

## 机电与智能化



移动扫码阅读

张旭辉,郭欢欢,马宏伟,等.基于生命周期的采煤机绿色评价方法研究及应用[J].煤炭科学技术,2021,49(6):205-212. doi:10.13199/j.cnki.cst.2021.06.024

ZHANG Xuhui, GUO Huanhuan, MA Hongwei, et al. Research and application of green evaluation method for shearer based on life cycle [J]. Coal Science and Technology, 2021, 49 (6): 205 - 212. doi: 10.13199/j.cnki.cst.2021.06.024

## 基于生命周期的采煤机绿色评价方法研究及应用

张旭辉<sup>1,2</sup>, 郭欢欢<sup>1</sup>, 马宏伟<sup>1,2</sup>, 车万里<sup>3</sup>, 潘格格<sup>1</sup>, 张超<sup>1</sup>, 赵友军<sup>3</sup>, 张玉良<sup>4</sup>, 毛清华<sup>1,2</sup>,  
樊红卫<sup>1,2</sup>, 杜昱阳<sup>1,2</sup>, 薛旭升<sup>1,2</sup>, 王川伟<sup>1,2</sup>, 董明<sup>1,2</sup>, 刘鹏<sup>1,2</sup>, 夏晶<sup>1,2</sup>, 曹现刚<sup>1,2</sup>

(1.西安科技大学 机械工程学院,陕西 西安 710054;2.陕西省矿山机电装备智能监测重点实验室,陕西 西安 710054;

3.西安煤矿机械有限公司,陕西 西安 710200;4.黄陵矿业集团有限公司煤矿智能化开采技术创新中心,陕西 黄陵 727307)

**摘要:**针对采煤机需求量大,在加工制造过程中存在的耗能大和环境污染等问题,提出了一种基于生命周期评价的采煤机生命周期绿色评价方法,结合 eFootprint 软件分析,对采煤机加工制造过程进行量化评价。首先,以采煤机摇臂传动系统为研究对象,通过采用多目标分析理论对其进行稳健性优化设计分析,确定以质量作为绿色评价的重要影响因素;其次,以“从原材料开采到采煤机出厂”为系统边界,建立采煤机质量信息物料清单表,在 eFootprint 软件中对采煤机整机进行建模,并按照铸件、锻件、焊接件的分类方式进行清单分析,对采煤机各生产环节的能量消耗和环境影响进行定量分析;最后,以采煤机的摇臂、牵引部以及截割电机 3 个部分为目标,对比各零部件对不同影响指标的累积贡献。分析结果表明:摇臂过程中能源消耗与全球变暖了潜力的贡献率最大的是摇臂壳体,分别为 49.50% 和 52.91%;牵引部过程中,机壳对能源消耗和全球暖化贡献率最大,分别为 64.55%、63.95%;截割电机过程中对能源消耗和全球变暖潜力的贡献率最大的是冲片-硅钢片,分别为 58.05%、63.27%。此方法可解决复杂机械产品绿色评价建模的问题,能识别出能源消耗最大的零部件以及对环境影响贡献最大者,可为企业提供绿色改进方向,同时为煤矿机械行业的绿色评价提供一定的借鉴与参考。

**关键词:**采煤机;采掘装备;生命周期评价;多目标分析;环境影响

**中图分类号:**TD421      **文献标志码:**A      **文章编号:**0253-2336(2021)06-0205-08

### Research and application of green evaluation method for shearer based on life cycle

ZHANG Xuhui<sup>1,2</sup>, GUO Huanhuan<sup>1</sup>, MA Hongwei<sup>1,2</sup>, CHE Wanli<sup>3</sup>, PAN Gege<sup>1</sup>, ZHANG Chao<sup>1</sup>,  
ZHAO Youjun<sup>3</sup>, ZHANG Yuliang<sup>4</sup>, MAO Qinghua<sup>1,2</sup>, FAN Hongwei<sup>1,2</sup>, DU Yuyang<sup>1,2</sup>, XUE Xusheng<sup>1,2</sup>  
WANG Chuanwei<sup>1,2</sup>, DONG Ming<sup>1,2</sup>, LIU Peng<sup>1,2</sup>, XIA Jing<sup>1,2</sup>, CAO Xiangang<sup>1,2</sup>

(1. College of Mechanical Engineering, Xi'an University of Science and Technology, Xi'an 710054, China; 2. Shaanxi Key Laboratory of Mine Electromechanical Equipment Intelligent Monitoring, Xi'an 710054, China; 3. Xi'an Coal Mining Machinery Co., Ltd., Xi'an 710200, China;  
4. Intelligent Mining Technology Innovation Center, Huangling Mining Group Co.Ltd., Huangling 727307, China)

**Abstract:** In view of the large demand for shears, the large energy consumption and environmental pollution in the processing and manufacturing process, a green evaluation method for shears based on life cycle evaluation is proposed. Combined with eFootprint software analysis, the process is quantitatively evaluated. First, taking the shearer rocker drive system as the research object, by using the multi-objective analysis theory to conduct robustness optimization design analysis, and determine the weight as an important influencing factor in green evaluation. Second, taking “cradle to gate” as the system boundary to establish a shearer weight information bill of material, and model the shearer in the efootprint software, and analyze the list according to the classification of castings, forgings, welding parts. The energy consumption and environmental pollution of each production link of shearer are analyzed quantitatively. Finally, taking the three parts

收稿日期:2020-11-21;责任编辑:李金松

基金项目:国家绿色制造系统集成资助项目(工信部节函[2017]327号);国家自然科学基金资助项目(51974228, 51834006);陕西省创新能力支撑计划资助项目(2018TD-032)

作者简介:张旭辉(1972—),男,陕西凤翔人,教授,博士生导师。E-mail: zhangxh@xust.edu.cn

of the shearer's rocker arm, traction unit and cutting motor as the target and compare the cumulative contribution of each component to different impact indicators in the calculation results. The results show that the rocker arm shell has the largest contribution rate of energy consumption and global warming during the rocker arm process, reaching 49.50% and 52.91%, respectively; during the traction, the shell has the largest contribution rate to energy consumption and global warming, reaching 64.55% and 63.95%, respectively; during motor cutting, the largest contribution rate to energy consumption and global warming is the impact sheet-silicon steel sheet, reaching 58.05% and 63.27%, respectively. This method can solve the problem of green evaluation modeling of complex mechanical products, identify the components that consume the most energy and contribute the most to the environment, and provide companies with green improvement directions and references for the coal mine machinery industry green evaluation.

**Key words:** shearer; mining equipment; life cycle assessment; multi-objective analysis; environmental impact

## 0 引 言

采掘装备是实现煤炭智能化开采的基础。近年来,安全、高效的采掘装备需求剧增<sup>[1-3]</sup>。在采煤机生命周期中,原材料运输、加工以及各零部件组装成整机,需要消耗大量的资源、能源,并且伴随着污染物的排放。因此,提高采煤机的绿色度,减少资源、能源消耗,降低排放是实现可持续发展战略的有效措施。生命周期评价(Life Cycle Assessment, LCA)是能够客观、定量分析的环境管理工具,ISO140140将LCA划分为4个步骤:目标与范围的确定、清单分析、影响评价和结果解释<sup>[4-5]</sup>。LCA从设计开始到回收处理的全生命周期过程中,评价不同阶段对环境的负荷与影响,进而改进工艺与产品设计,指导企业降低污染,减少环境影响,实现经济与环境的可持续发展<sup>[6]</sup>。

目前国内外不少学者将LCA方法应用到各个领域,对不同的产品进行绿色评价与分析。文献[7]运用LCA方法对一种新型秸秆包墙从“稻草捆收集到新型秸秆墙完成”的系统边界进行研究,分析秸秆包和天然膏体的热性能以及对环境的影响,通过对比分析得出新墙体的应用更节能,对环境的影响更小。文献[8]采用LCA方法对建筑施工阶段预制混凝土桩的碳足迹进行研究,得出预制混凝土桩施工阶段,桩基础面积、造价、数量与碳排放总量呈较强的线性关系,为建筑行业的定量修正碳足迹提供理论参考。文献[9]运用环境与火用LCA方法,对褐煤直接燃烧发电系统和褐煤热解燃烧分级转化多联产系统的环境影响与能量转化进行了分析,得出多联产系统的应用极大地降低了褐煤燃烧对环境的影响,同时更高效地进行能量转化。文献[10]构建了一种基于全生命周期的机电产品碳足迹评价流程和评估模型,并以榨汁机的碳足迹为研究目标进行计算评价,确定了降低电网的排放因子等关键措施,同时也验证了所提出的产品碳足迹评价流程和评估模型对实现产品低碳化的有效性。

目前,国内外对大型机械装备绿色设计评价研究较少,矿山采掘装备的绿色设计与评价方面工作基本空白。在国家绿色制造系统集成项目(工信部节函〔2017〕327号)支持下,课题组以矿山采掘装备绿色设计为切入点,开展面向苛刻服役环境的采掘装备全生命周期的绿色制造系统集成研究,使采掘装备在研发设计、制造、使用、回收、拆解与服役再制造等全生命周期的关键环节实现制造绿色化、性能高、可靠性强和服役寿命长等<sup>[11]</sup>,研发了面向采掘装备的产品生命周期资源环境影响评价技术和软件工具。

基于此,笔者研究了基于生命周期评价的采煤机生命周期评价方法,应用生命周期评价方法优化原料选择、产品设计和制造方案,构建产品全生命周期管理与评价体系,并以电牵引采煤机为例,以“从原材料开采到采煤机出厂”为系统边界,建立采煤机LCA模型,分别对摇臂、牵引部、截割电机进行具体评价并分析其能耗和环境贡献率,形成一套采掘装备绿色设计评价工具和平台,可实现功耗、原材料质量、噪声污染、设备状态、综合能耗、使用寿命等方面绿色化的评价。

## 1 采煤机 LCA 模型建立

生命周期评价模型是针对产品生命周期全过程,通过量化各阶段的重要信息,选择合适的建模方法,在软件中建立生命周期评价模型。在采煤机模型建立时,首先要考虑采煤机在全生命周期中包含的几个阶段;其次,通过调研分析各阶段过程中能耗及排放是否容易收集并进行定量及定性分析;最后,分析采煤机各阶段的特征,确定研究目标和范围,按照全生命周期的方法在eFootprint软件中建模。

### 1.1 采煤机 LCA 评价影响因素确定

为提高采煤机评价结果的可靠性,需选择有代表性的评价影响因素进行评价,避免评价结果的单一性、片面性。以摇臂传动系统为例,采用多目标分析理论对其进行稳健性优化设计分析。基于多目标的优

化设计可用以下数学模型来表示<sup>[12]</sup>:

$$\begin{cases} \min f(X) = \sum_{k=1}^n \omega_k f_k(\bar{X}) \\ R - R_0 \geq 0 \\ q_i(\bar{X}) \geq 0 \quad (i = 1, 2, \dots, l) \\ h_j(\bar{X}) \geq 0 \quad (j = 1, 2, \dots, m) \end{cases}$$

式中:  $f(X)$  为优化目标函数;  $X$  为优化目标;  $f_k(\bar{X})$  为分目标的优化函数;  $\omega_k$  为分目标优化函数的加权平均因子;  $k$  为分目标;  $R$  为传动系统的疲劳寿命可靠度;  $R_0$  为目标函数的设计可靠度;  $q_i(\bar{X})$  为不等式约束;  $h_j(\bar{X})$  为等式约束;  $i, j$  分别为零部件和阶次。

在摇臂传动系统中,为避免传动齿轮安装的中心距离对摇臂工作时的传动角度,以及对摇臂传动机构的壳体造成影响,将齿轮的变位系数  $x_1$ 、齿宽  $B_1$  以及行星齿轮的变位系数  $x_2$ 、齿宽  $B_2$  等参数作为优化目标进行分析。

1) 优化方案 1。把摇臂传动系统的疲劳寿命可靠性作为优化目标,将其他参数设置在标准取值内,将优化目标调整为

$$\begin{cases} S_{a1} \geq 0.25m_1 \\ S_{a2} \geq 0.25m_2 \\ \varepsilon_1 \geq 1 \\ \varepsilon_2 \geq 1 \end{cases}$$

式中:  $S_{a1}$  为齿轮的齿顶厚;  $m_1$  为齿轮的模数;  $S_{a2}$  为太阳轮的齿顶厚度;  $m_2$  为行星轮的模数;  $\varepsilon_1$  为齿轮工作时的重合度;  $\varepsilon_2$  为行星轮工作时的重合度。

2) 优化方案 2。将疲劳寿命可靠度对各个变量参数的平均灵敏度做了优化目标参数,其优化模型可表示为

$$\min f(X) = \sqrt{\sum_{i=1}^2 \left( \frac{\partial R(X)}{\partial x_i} \right)^2}$$

式中:  $R(X)$  为目标函数的可靠性函数;  $x_i$  为齿轮变位系数。

3) 优化方案 3。充分评估传动机构齿轮的体积和工作时的振动冲击情况,并把可靠性函数作为约束函数考虑,其优化方程为

$$\begin{cases} \min f(X) = 0.0017B_1 + 0.0008B_2 + \sqrt{\sum_{i=1}^2 \left( \frac{\partial R(X)}{\partial x_i} \right)^2} \\ R(X) \geq 0.9999 \end{cases}$$

利用 Matlab 仿真软件分别对以上 3 种优化方案进行求解分析,结果见表 1。方案 1 通过改变齿

轮的变位系数来确保在可靠度最大的情况下保证传动系统结构的质量不变;方案 2 能够确保系统稳定性的最大化,但齿轮齿宽的增加会导致整个传动系统结构的质量增加;方案 3 在保证系统稳定性最大化的情况下,同时确保系统结构质量和制造成本的最小化。对比 3 种方案可知优化方案 3 能够在保证传动系统的疲劳使用寿命的基础上最大程度地降低传动系统的结构质量和制造成本,减少能源消耗、资源浪费以及环境污染<sup>[13]</sup>。因此,可将质量作为重要影响因素对采煤机进行 LCA 评价。

表 1 3 种优化方案求解分析结果

Table 1 Results of three optimization schemes

方案	原始值	方案 1	方案 2	方案 3
齿轮齿宽/mm	70	70	80	70
齿轮变位系数	0.405	0.357	0.305	0.305
行星轮齿宽/mm	130	130	130	130
行星轮变位系数	0.649	0.612	0.561	0.561

## 1.2 目标与范围确定

目标和范围确定是生命周期评价的首要步骤,影响着产品在评价过程中的复杂程度和评价结果的可靠性。主要内容为确定目标产品、功能单位与基准流、系统边界、数据代表性、基准年以及产地等信息<sup>[14-15]</sup>。

采煤机作为重型机电装备,结构复杂,零部件数量和种类繁多,不同工艺下的零件性能相差较大,通过调研分析,以 MG1000/2550-GWD 型交流电牵引采煤机为例,将生产 1 台交流电牵引采煤机的质量(总质量 168 t)作为功能单位,系统边界为“从摇篮到大门”类型。生命系统边界如图 1 所示<sup>[16-17]</sup>。通过企业调研,收集 2018 年中国制造的采煤机生产过程的实景数据,建立物料清单表(Bill of Material, BOM)。

自然资源

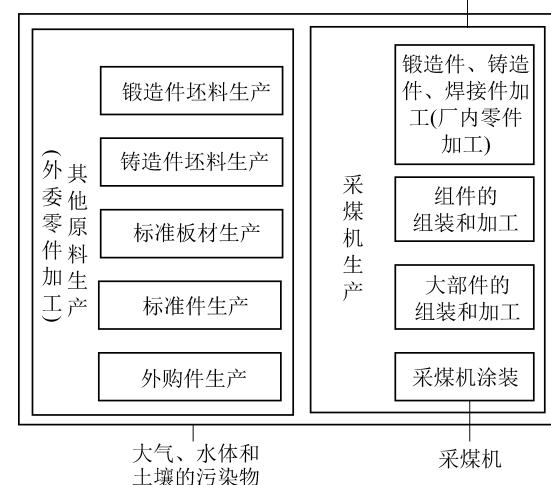


图 1 采煤机生命周期系统边界

Fig.1 Boundary of shearer life cycle system

eFootprint 软件包括中国生命周期基础数据(CLCD)、欧盟 ELCD 等数据库,可追溯各种原料的

上游生产过程直到资源开采为止,得到背景数据<sup>[18]</sup>。采煤机产品常见原料的背景数据见表 2。

表 2 常见原料背景数据

Table 2 Background datas on common raw materials

项目	成分	背景数据来源	备注
电力	—	CLCD-China 0.8 西北电力传输	—
蒸汽	—	CLCD-China 0.8 蒸汽(0.75 MPa 170 °C)	—
自来水	—	CLCD-China 0.9 自来水	—
机壳	ZG35MnF8	CLCD-China 0.8 热轧宽带钢(碳钢)(中国)	近似替代
齿轮	18Cr2Ni4WA	CLCD-China 0.8 热轧宽带钢(碳钢)(中国)	近似替代
壳体	Q345	CLCD-China 0.8 碳钢-转炉炼钢(中国)	近似替代
笼条-拉制铜扁线/TMY	铜	CLCD-China 0.8 电解铜-火法炼铜(中国)	截割电机
煤	无烟煤	CLCD-China 0.8 无烟煤-无烟煤运输后(中国)	截割电机能源
涂料	—	Ecoinvent 3.1 market for paint	包含底漆和面漆
运输	柴油货车	CLCD-China 0.8 货车运输-20 t	—

### 1.3 采煤机 LCA 建模方法

由图 1 可知,生产 1 台交流电牵引采煤机,从原材料开采到整机出厂过程中,主要包括外委零件加工、厂内零件加工、组件组装、大部件组装、采煤机装配以及采煤机涂装等过程。根据该生产过程,将采煤机的生命周期评价模型按照基础物料-零件-组件-部件-大部件的层级顺序逐层建模,以大部件-摇臂为例按照层级顺序展开的生命周期如图 2 所示。例如,使用基础物料 40CrMo 加工出行星架内套和行星架外圈 2 种零件,再由行星架内套和外圈组成Ⅱ级行星架组件,由Ⅱ级行星架、垫、内齿圈组成部件-行星减速器,最后由摇臂壳体、行星减速器、中心齿轮组等部件组成大部件-摇臂。按照该建模方法,在 eFootprint 软件中对采煤机各重要零部件进行建模。

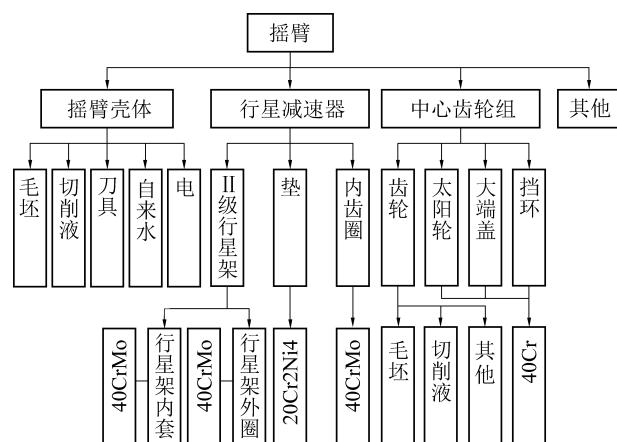


图 2 大部件-摇臂部分生命周期示意

Fig.2 Schematic of life cycle of large part-rocker arm

### 2 采煤机 LCA 清单分析

清单分析是根据研究对象的系统边界,对其资

源、能源的消耗以及对环境的排放进行定量分析,过程主要包括原材料、运输、中间产品的加工以及最终产品的废弃等。清单分析主要是通过产品功能单位来表达资源、能源的输入以及环境排放<sup>[19]</sup>。

采煤机在生产过程中,主要投入包括毛坯、切削液、刀片、刀柄、自来水、机油、焊条、电等。由于零部件的加工工艺、资源和能源消耗各不相同,因此,在对采煤机的加工过程进行清单数据收集时,将主要用到的外委加工零件与厂内加工零件按照机械原理分别分成铸件、锻件和焊接件 3 大类进行数据收集。其中,铸件主要包括摇臂壳体、牵引壳体、行走壳体、连接架、导向滑靴;锻件主要包括轴齿轮、齿轮、太阳轮、内齿圈、行星架、行星架;焊接件主要包括框架、高压开关箱、变频器箱、变压器箱、泵箱<sup>[20]</sup>。

外委加工零件通过远程调研的方法,收集上游企业相关零件的加工数据,建立了数据清单,见表 3。厂内加工零件通过企业现场调研,收集零件加工数据,选取具有代表性的数据进行整理,得到零件加工数据清单,见表 4。涉及到的标准件数据由 eFootprint 中基础数据库提供。同时,以 eFootprint 软件中各项原材料投入占产品质量或过程总投入的质量比为依据作为取舍规则,无副产品产生、无再生原料消耗、无废弃再生过程,由此得到采煤机加工制造的 LCA 清单数据。

### 3 采煤机 LCA 结果分析与解释

完成采煤机生命周期建模之后,对采煤机进行评价,得到加工过程中各零部件对初级能源消耗(Primary Energy Demand, PED)、非生物资源消耗潜值(Abiotic Depletion Potential, ADP)、全球变暖潜力

**表3 采煤机外委加工零件加工数据清单(部分)**  
**Table 3 List of machining data for outboard parts of shearer (section)**

类型	项目	零件图编号	纯铝质量/kg	钢材质量/kg	电力/(kW·h)	天然气体积/m <sup>3</sup>	固废质量/kg
铸件	摇臂壳体毛坯	CON0553010D	13.273 6	12 492.80	18.28	1.96	108.21
	牵引壳体毛坯	CON011101010G	21.144 0	22 271.68	31.25	6.01	251.11
	行走壳体毛坯	CON0118010B	2.970 0	4 217.40	15.01	4.21	89.01
锻件	轴齿轮毛坯	CON055304-010A	—	133	1.37	0.18	5.32
	齿轮毛坯	CON055308-01	—	228	2.32	0.19	9.12
	太阳轮毛坯	CON055309-03	—	168	1.64	0.17	6.72

**表4 采煤机厂内加工零件加工数据清单**  
**Table 4 List of processing data for machining parts in shearer plant**

类型	项目	零件图编号	原辅料质量/kg								能源 电耗/(kW·h)
			成活	毛坯	切削液	刀片	刀柄	自来水	机油	焊条	
铸件	摇臂壳体	CON0553010D	5 356.07	7 808	100	1.12	6	200	—	—	10 010
	牵引壳体	CON011101010G	11 600	14 096	80	0.92	5	150	—	—	8 000
	行走壳体	CON0118010B	1 885	2 970	80	0.68	4	120	—	—	7 000
锻件	轴齿轮	CON055304-010A	73.286	99.8	30	0.08	2	60	10	—	1 600
	齿轮	CON055308-01	91.549	219.5	30	0.08	2	60	10	—	1 200
	太阳轮	CON055309-03	84.327	160.6	30	0.08	2	60	10	—	1 300
焊接件	框架	CON01170M	9 154.74	9 154.74	30	0.08	2	60	—	20	4 000
	高压开关箱	CON0114010A	1 226	1 226	30	0.08	2	60	—	20	4 600
	变频器箱	CON0115010B	1 500	1 500	30	0.08	2	60	—	20	4 600

(Global Warming Potential, GWP)、富营养化(Eutrophication, EP)等影响指标的贡献率,累加各零部件对资源环境影响的贡献率(图3),由图3可知大部件-摇臂对环境影响的贡献率最大。其中,ADP指标对环境影响的贡献最大,达到了49.97%,PED指标对环境影响的贡献达18.77%,GWP指标对环境影响的贡献达19.35%,由于每台采煤机中有2个摇臂,2个摇臂的质量达23 100 kg,占采煤机总质量的14%。同时,摇臂在生产中使用大量的钢铁,极大地提高了采煤机对ADP指标的影响。根据以上结论,分别对大部件-摇臂过程、大部件-牵引部过程以及大部件-截割电机过程等单个过程进行分析。

### 3.1 摆臂部结果分析与解释

应用eFootprint软件分析摇臂在加工制造过程中对PED、ADP、GWP以及EP等影响指标的贡献率。其中,摇臂中摇臂壳体的加工制造过程对PED、GWP的贡献率最大,分别达到了49.50%、52.91%,II行星架的加工制造对PED、GWP的贡献率次之,分别达到了6.10%、5.60%,轴承座的加工制造对PED、GWP的贡献率分别为4.34%、3.98%。

摇臂壳体加工过程对PED和GWP指标的贡献

占比分别见表5和表6,可知含98.91%钢材的毛坯在摇臂壳体加工过程中对PED和GWP指标的贡献比最大,分别为66.08%、67.12%;电的消耗对PED和GWP指标的贡献比次之,分别为33.86%、32.83%。

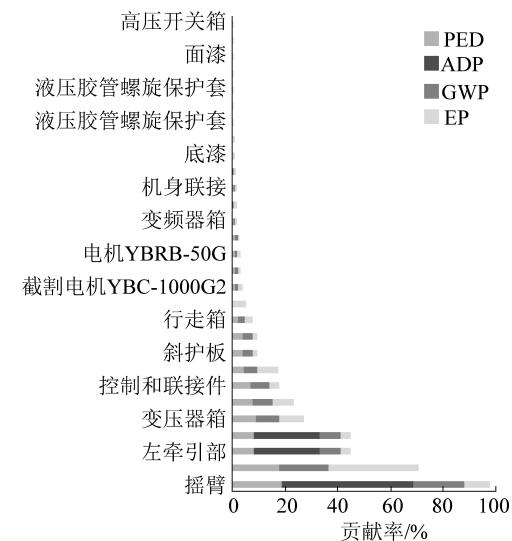


图3 1台采煤机(MG1000/2550-GWD)重要大部件对环境影响的贡献率

Fig.3 Contribution of important component of a shearer (MG1000/2550-GWD) to environment

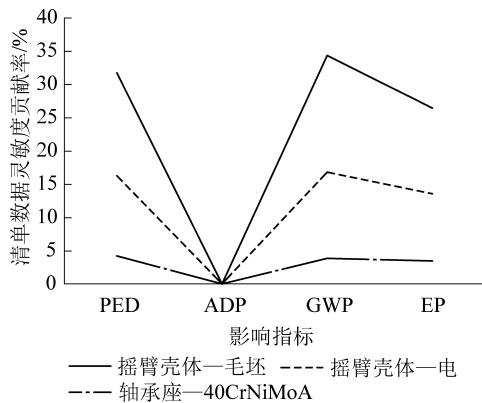
**表5 摆臂壳体加工过程 PED 指标贡献比****Table 5 Contribution ratio of feed index in rocker shell process**

原材料	毛坯	电	自来水	刀具	切削液
所占比例/%	66.08	33.86	0	0.05	0

**表6 摆臂壳体加工过程 GWP 指标贡献比****Table 6 Contribution ratio of GWP index in processing rocker shell**

原材料	毛坯	电	自来水	刀具	切削液
所占比例/%	67.12	32.83	0	0.05	0

清单数据灵敏度是指清单数据单位变化率引起的相应指标变化率。通过对清单数据灵敏度的分析,更有效的得到改进点。因此,得到摇臂过程中各阶段对 PED 和 GWP 的贡献比数据之后,对清单数据灵敏度进行分析,如图 4 所示。由图 4 可知,对各指标结果均贡献较大的上游数据是摇臂壳体过程的毛坯、电力。因此,对于大部件-摇臂过程来说,可通过优化毛坯加工工艺、优化摇臂设计等来降低摇臂壳体过程中毛坯对环境的排放。

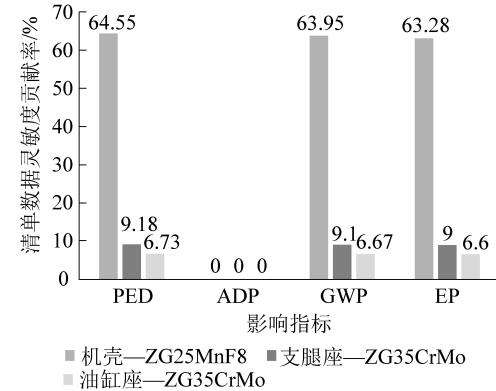
**图4 采煤机-摇臂过程清单数据灵敏度贡献率****Fig.4 Shearer-rocker process inventory data sensitivity contribution rate**

### 3.2 牵引部结果分析与解释

分析牵引部在加工制造过程中对各影响因素的贡献率。其中,牵引部中机壳的加工制造过程对 PED 和 GWP 的贡献率最大,分别达到了 64.55%、63.95%;支腿座的加工制造过程对 PED 和 GWP 的贡献率次之,分别达到了 9.18%、9.10%;油缸座的加工制造过程对 PED 和 GWP 的贡献率分别为 6.73%、6.67%。

根据机壳加工过程对 PED 与 GWP 的贡献率最大,进一步分析机壳加工过程中各原材料加工过程对 PED 与 GWP 的贡献率。其中,材料 ZG25MnF8 的加工过程对 PED、GWP 的贡献最大,均为 77.34%,材料 ZG35CrMo 的加工过程对 PED、GWP 的贡献次之,均为 11.00%。

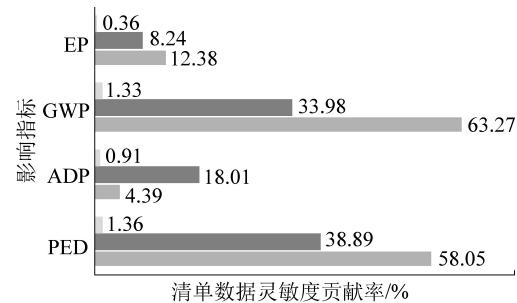
对采煤机-牵引部进行清单数据灵敏度分析,如图 5 所示。由图 5 可知,对各指标结果贡献较大的上游数据是机壳过程的 ZG35MnF8。因此,对于大部件-牵引部过程来说,可以选择性能相同的清洁材料来替代该材料等方法来降低大部件-牵引部过程对环境的排放。

**图5 采煤机-牵引部过程清单数据灵敏度贡献率****Fig.5 Shearer-traction department process inventory data sensitivity contribution rate**

### 3.3 截割电机结果分析与解释

分析截割电机在加工制造过程中对影响指标的贡献率。其中,截割电机中冲片-硅钢片的加工制造对过程对 PED 和 GWP 贡献均最大,分别达到了 58.05%、63.27%,机座和端盖的加工制造过程对 PED 和 GWP 的贡献率次之,分别为 38.89%、33.98%,轴的加工制造过程对 PED 和 GWP 的贡献率分别为 1.36%、1.33%。

对采煤机-截割电机进行清单数据灵敏度分析,如图 6 所示。由图 6 可知,对各指标结果贡献均较大的上游数据是大部件-截割电机过程的冲片-硅钢片、机座和端盖。因此,对于大部件-截割电机过程来说,可以通过改进冲片-硅钢片的加工工艺等方法来降低大部件-截割电机过程对环境的排放。

**图6 采煤机-截割电机过程清单数据灵敏度贡献率****Fig.6 Shearer-cutting motor process inventory data sensitivity contribution rate**

## 4 结 论

1)通过多目标分析理论对采煤机机械传动系统进行稳健性优化设计分析,得出以质量为重要影响因素对 MG1000/2550-GWD 型交流电牵引采煤机进行 LCA 评价。其中,摇臂的质量占整机的 14%,需消耗大量钢材,累加各项环境指标贡献率可知,摇臂对 GWP、ADP 以及 PED 的指标贡献最大。

2)用来制造摇臂壳体的毛坯的加工过程对 PED 和 GWP 的贡献率分别为 66.08%、67.12%;牵引部机壳加工所需材料 ZG25MnF8 的加工过程对 PED 和 GWP 的贡献率均为 77.34%;截割电机的冲片-硅钢片的加工过程对 PED 和 GWP 的贡献率分别为 58.05%、63.27%。因此,可对坯料的供应商提出绿色规范化要求,促进标准化生产;对厂内零件加工过程进行节能优化,减小能源消耗,降低加工时坯料的损耗。

3)针对采煤机加工制造过程,按照课题研究的采掘装备零件分类方法,简化了复杂机械产品的 LCA 建模,根据 LCA 分析结果,为采煤机的优化提供改进方向。下一步将从设计到报废的全生命周期过程对采掘装备的 LCA 评价进行研究,并按照清单数据建立铸件、锻件、焊接件数据库,为建设机械行业数据库打好基础,为同类型产品的生命周期评价提供参考。

### 参考文献(References):

- [1] 王国法,杜毅博.智慧煤矿与智能化开采技术的发展方向[J].煤炭科学技术,2019,47(1):1-10.  
WANG Guofa, DU Yibo. The development direction of smart coal mine and smart mining technology [J]. Coal Science and Technology, 2019, 47(1):1-10.
- [2] 谢和平,王金华,王国法,等.煤炭革命新理念与煤炭科技发展构想[J].煤炭学报,2018,43(5):1187-1197.  
XIE Heping, WANG Jinhua, WANG Guofa, et al. New ideas of coal revolution and layout of coal science and technology development [J]. Journal of China Coal Society, 2018, 43(5):1187-1197.
- [3] 王国法.煤炭安全高效绿色开采技术与装备的创新和发展[J].煤矿开采,2013,18(5):1-5.  
WANG Guofa. Innovation and development of safe, high-efficiency and green coal mining technology and equipments [J]. Coal Mining Technology, 2013, 18(5):1-5.
- [4] 陈理,林樾,李琳睿,等.基于 LCA 的比亚迪宋系列新能源汽车节能减排效果分析与评价[C]//2019 中国环境科学学会科学技术年会论文集(第三卷).北京:中国环境科学学会,2019:8-18.  
CHEN Li, LIN Yue, LI Linrui, et al. Analysis and evaluation of energy saving and emission reduction effects of BYD Song series new energy vehicles based on LCA [C]//Proceedings of the 2019 Chinese Society of Environmental Sciences Annual Conference on Science and Technology (Volume 3). Beijing: China Society of Environmental Science, 2019:8-18.
- [5] 张旭辉,潘格格,张雨萌,等.采掘装备绿色设计与评价技术研究[J].工矿自动化,2020,46(2):23-28,49.  
ZHANG Xuhui, PAN Gege, ZHANG Yumeng, et al. Research on green design and evaluation technology of mining equipment [J]. Industry and Mining Automation, 2020, 46(2):23-28, 49.
- [6] 陈莎,刘尊文.生命周期评价与Ⅲ型环境标志认证[M].北京:中国标准出版社,2014:2-3.
- [7] CORNARO C, ZANELLA V, ROBAZZA P, et al. An innovative strawbale wall package for sustainable buildings: experimental characterization, energy and environmental performance assessment [J]. Energy & Buildings, 2020, 208:101-108.
- [8] LI XiaoJuan, ZHENG Yandan. Using LCA to research carbon footprint for precast concrete piles during the building construction stage: a China study [J]. Journal of Cleaner Production, 2020, 245:123-128.
- [9] 汤元君,池涌,董隽,等.褐煤热解分级转化多联产系统环境与火用生命周期评价[J].煤炭学报,2018,43(12):3510-3517.  
TANG Yuanjun, CHI Yong, DONG Jun, et al. Environmental and exergy life cycle assessment of lignite pyrolysis hierarchical conversion poly-generation system [J]. Journal of China Coal Society, 2018, 43(12):3510-3517.
- [10] 王欣,李文强,李彦.基于生命周期的机电产品碳足迹评价与实现方法[J].机械设计与制造,2016(5):1-4.  
WANG Xin, LI Wenqiang, LI Yan. Evaluation and realization method of carbon footprint of electromechanical products based on life cycle [J]. Machine Design and Manufacturing, 2016(5):1-4.
- [11] 曹华军,李洪丞,曾丹,等.绿色制造研究现状及未来发展策略[J].中国机械工程,2020,31(2):135-144.  
CAO Huajun, LI Hongcheng, ZENG Dan, et al. Green manufacturing research status and future development strategies [J]. China Mechanical Engineering, 2020, 31(2):135-144.
- [12] 张义民,黄婧,朱丽莎,等.采煤机摇臂传动系统可靠性稳健优化设计[J].煤炭学报,2015,40(11):2540-2545.  
ZHANG Yimin, HUANG Jing, ZHU Lisha, et al. The reliability and robust optimization design of the rocker arm transmission system of the shearer [J]. Journal of China Coal Society, 2015, 40(11):2540-2545.
- [13] 邱兴文.采煤机摇臂传动系统的优化设计[J].机电工程技术,2019,48(8):210-212.  
QIU Xingwen. Optimization design of shearer rocker drive system [J]. Electromechanical Engineering Technology, 2019, 48(8):210-212.
- [14] 陈雪晴,郑艳丹,赖芨芨,等.基于 LCA 的混凝土预制桩施工阶段碳足迹研究[J].哈尔滨商业大学学报(自然科学版),2019,35(4):473-477,493.  
CHEN Xueqing, ZHENG Yandan, LAI Yanji, et al. Study on LCA carbon footprint of concrete prefabricated pile construction

- stage [J]. Journal of Harbin Commercial University; Natural Science Edition, 2019, 35(4): 473-477, 493.
- [15] 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.  
ZHENG Handong, CHEN Yi, LI Enzhong, et al. Life cycle assessment modeling and application of remanufacturing product service system [J]. China Mechanical Engineering, 2018, 29(18): 2197-2203.
- [16] 李嘉文, 宋小龙, 赵 迪. 基于 LCA 的废弃手机资源化有效运输范围量化研究 [J]. 中国环境科学, 2019, 39(2): 698-705.  
LI Jiawen, SONG Xiaolong, ZHAO Di. Quantitative research on the effective transportation range of recycling waste mobile phones based on LCA [J]. China Environmental Science, 2019, 39(2): 698-705.
- [17] 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.  
ZHANG Congguang, QIU Ling, WANG Fei et al. Research on the environmental impact of biogas ecological orchard on the loess plateau based on LCA [J]. Journal of Agricultural Environmental Sciences, 2018, 37(4): 833-840.
- [18] 禹 朋, 岑晓倩, 熊洪业, 等. 基于 LCA 装配式木结构民居的建造过程碳排放计算 [J]. 科学技术创新, 2019(11): 108-110.  
YU Peng, CEN Xiaoqian, XIONG Hongye, et al. Calculation of carbon emission in construction process based on LCA assembly wooden structure houses [J]. Science and Technology Innovation, 2019(11): 108-110.
- [19] 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.  
ZHENG Handong, CHEN Yi, LI Enzhong, et al. Modeling and application of life cycle evaluation of remanufacturing product service system [J]. China Mechanical Engineering, 2018, 29(18): 2197-2203.
- [20] 贺声阳, 刘混举. 电牵引采煤机牵引部可靠性建模探讨 [J]. 机械工程与自动化, 2009(6): 111-112.  
HE Shengyang, LIU Hunju. Reliability modeling of traction part of electric traction shearer [J]. Mechanical Engineering and Automation, 2009(6): 111-112.