



文章编号:1671-251X(2020)02-0023-07

DOI:10.13272/j.issn.1671-251x.2019060032

采掘装备绿色设计与评价技术研究

张旭辉^{1,2}, 潘格格¹, 张雨萌¹, 樊红卫^{1,2}, 毛清华^{1,2},
车万里³, 薛旭升^{1,2}, 王川伟^{1,2}, 赵友军³



扫码移动阅读

- (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 710032)

摘要:针对采掘装备设计存在过于依靠经验、人工计算偏差大而导致设计质量差、设计周期长等问题,以矿山采掘装备绿色设计为切入点,围绕需求分析、绿色设计、评价三大环节分析了采掘装备绿色设计总体方案,从设计绿色化、制造工艺绿色化、激光熔覆修复再制造技术、掘进系统智能化及状态监测与故障诊断五方面分析了采掘装备绿色设计关键技术。以采煤机为例,对其进行绿色设计分析,从资源、人机、能源、环境、经济、技术六大属性出发,构建了采煤机绿色设计评价指标体系,建立了采煤机绿色设计信息数据库。在设计阶段考虑采掘装备的绿色性,可提高采掘装备的生产质量,对推进煤炭行业绿色设计资源的共建共享及增强行业绿色化设计的示范作用具有重要意义。

关键词:采掘装备;采煤机;绿色设计;绿色评价;全生命周期设计

中图分类号:TD632/421

文献标志码:A

Research on green design and evaluation technology of mining equipment

ZHANG Xuhui^{1,2}, PAN Gege¹, ZHANG Yumeng¹, FAN Hongwei^{1,2}, MAO Qinghua^{1,2},
CHE Wanli³, XUE Xusheng^{1,2}, WANG Chuanwei^{1,2}, ZHAO Youjun³

- (1. School 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 710032, China)

Abstract: In view of problems of poor design quality and long design cycle in design of mining equipment caused by relying too much on experience and large deviation in manual calculation, taking green design of mining equipment as the starting point, the overall green design scheme of mining equipment is analyzed based on three links of demand analysis, green design and evaluation, the key technologies of green design of mining equipment are analyzed from five aspects: green design, green manufacturing process, laser cladding repair and remanufacturing technology, intelligent tunneling system, and condition monitoring and fault diagnosis. Taking shearer as an example, its green design is analyzed. Starting from six attributes of resources, man-machine, energy, environment, economy and technology, evaluation index system of green design of shearer is set up, and green design information database of shearer is established. Considering greenness of mining equipment in design stage can improve production quality of mining equipment, which is greatly significant for promoting co-construction and

收稿日期:2019-06-13;修回日期:2020-01-17;责任编辑:李明,郑海霞。

基金项目:国家绿色制造系统集成项目(工信部节函[2017]327号);陕西省创新能力支撑计划项目(2018TD-032)。

作者简介:张旭辉(1972—),男,陕西凤翔人,教授、博士,主要研究方向为煤矿机电设备智能检测与控制,E-mail:zhangxh@xust.edu.cn。

引用格式: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.

ZHANG Xuhui, PAN Gege, ZHANG Yumeng, et al. Research on green design and evaluation technology of mining equipment[J]. Industry and Mine Automation, 2020, 46(2): 23-28.

sharing of green design resources in the coal industry and enhancing the demonstration of green design in the industry.

Key words: mining equipment; shearer; green design; green evaluation; full life cycle evaluation

0 引言

“绿色制造工程”作为“中国制造 2025”重点实施的五大工程之一,是当前推行绿色制造的导向^[1]。绿色设计是推动产品可持续发展的核心理念,实现产品绿色化、评价产品绿色化程度对其具有重大意义。

《中国制造 2025——能源装备实施方案》中指出,突破一批能源清洁低碳和安全高效发展的关键技术装备并开展示范应用。采掘装备作为煤炭开采的关键设备,研究其绿色设计与评价技术对实现煤炭绿色开采、资源合理利用、生态经济协调发展具有重要的实践意义^[2-6]。

传统的采掘装备设计大多依靠经验,通过类比分析或经验公式来确定设计方案,人工计算偏差较大;采用近似法、静态法时,参照数据偏向归纳与囊括,数学建模过程中忽视了一些非主导因素,导致设计结果的近似性偏大,设计质量差、周期长、费用高。以绿色设计平台为目标,构建绿色评价体系 and 绿色设计信息数据库,在设计阶段考虑采掘装备的绿色性,并对关键技术进行创新和绿色化改造,可提高采掘装备的生产质量。

本文基于目前绿色设计及评价技术方面的研究成果^[7-10],提出了采掘装备全生命周期设计内涵;考虑到设计制造、运用维护、销售运输与回收处置等阶段的绿色设计要求,以及绿色设计平台建设需求,分析了采掘装备绿色设计内容及关键技术;以采煤机为研究对象,构建了采煤机绿色设计评价指标体系,并建立了面向采煤机的绿色设计信息数据库。

1 采掘装备绿色设计

1.1 采掘装备绿色设计总体方案

采掘装备绿色设计以提升生产过程绿色度为目标,依托自然资源、能源及企业多年积累的先进技术、平台资源,重点解决产品研发设计、加工制造、运输、使用维护、拆卸回收及服役再制造各个环节绿色发展的前沿问题及煤矿的共性问题。

采掘装备绿色设计围绕需求分析、绿色设计、评价三大环节,以绿色化设计为准则,对设计方案进行评估并不断反馈优化,具体如图 1 所示。

依据产品全生命周期管理理念,遵循能源资源消耗最低化、生态环境影响最小化、可再生率最大化

原则,面向全生命周期各个环节实施绿色化改造。采掘装备全生命周期内容如图 2 所示。

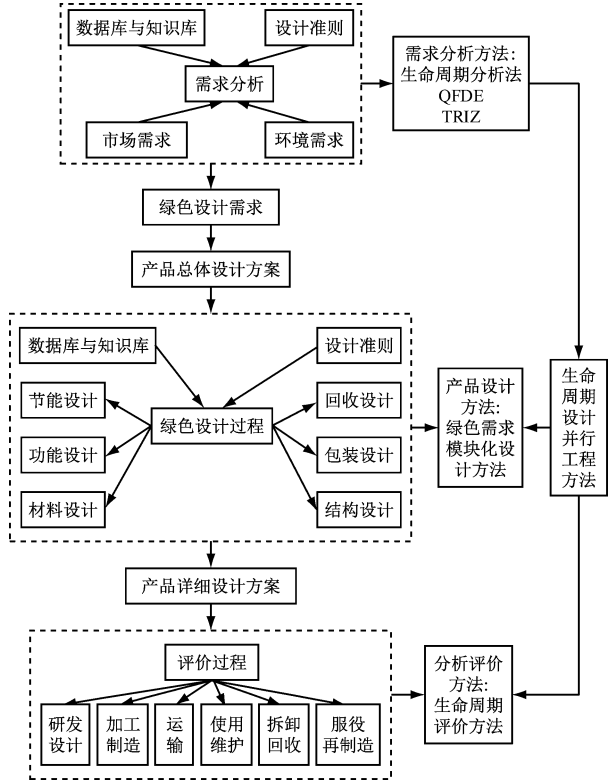


图 1 采掘装备绿色设计总体方案

Fig. 1 General scheme of green design for mining equipment

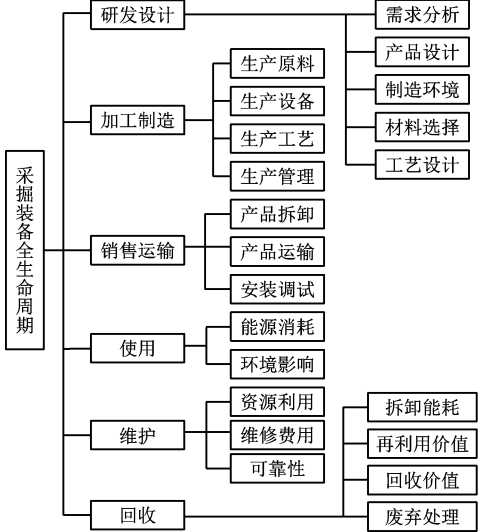


图 2 采掘装备全生命周期内容

Fig. 2 Full life cycle contents of mining equipment

1.2 采掘装备绿色设计关键技术

1.2.1 设计绿色化

采掘装备绿色设计以并行工程为指导思想,以面向采掘装备全生命周期过程为基础,全方位考虑产品及其生命周期信息,并动态改变产品开发流程。

采掘装备绿色设计对传统串行开发过程中存在的信息反馈非实时性、开发周期长、成本高等问题进行改进,采用CAXA电子图版等现代设计软件进行虚拟仿真,并根据结果不断反馈,从而确定最终方案。采掘装备绿色设计过程如图3所示。

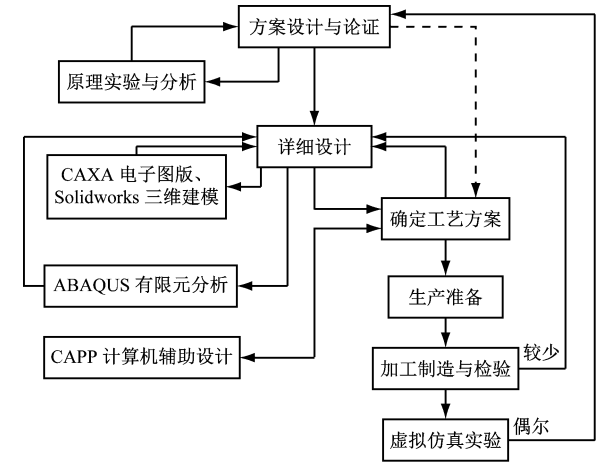


图3 采掘装备绿色设计过程

近年来,有单位采用CAXA电子图版、Solidworks三维建模、ABAQUS有限元分析等软件,对采掘装备整机及关键零部件进行三维设计^[11]、运动仿真^[12-13]、动力学建模^[14]和有限元优化分析^[15],解决了整机结构优化、滑靴受力分析^[16]、摇臂部受力及共振等问题,提高了采掘装备的可靠性。部分关键零部件有限元分析如图4所示。

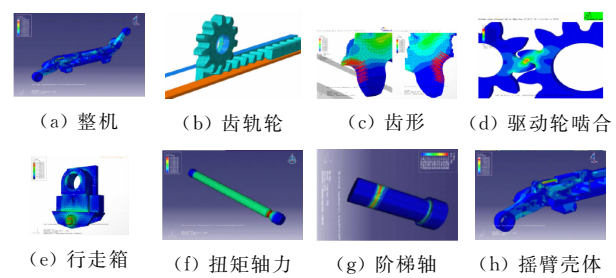


图4 关键零部件有限元分析

Fig. 4 Finite element analysis of key components

采掘装备绿色设计主要围绕产品的三维设计、数字化仿真,开展轻量化选材和高可靠性结构设计等相关工作,在产品设计、结构设计和验证反馈阶段,对总体方案预校核、部件设计模块化、零件设计仿真化、装配过程虚拟化等节点进行绿色化设计创新。绿色设计内容主要围绕以下方面展开。

(1) 产品设计模块化。针对采掘装备的不同功能模块或相同功能下的不同配套适应性需求,在对不同规格的产品进行功能分析的基础上,划分并设计一系列功能模块,一般根据产品规格予以实现。通过模块构成和选择,可使产品满足不同用户需求。模块化设计不仅有助于降低产品规格,还有助于提

升产品质量,为提升产品竞争力打下良好基础。

(2) 产品优化设计。借助三维建模和虚拟仿真进行产品抽象构思,扩展设计思维、评估优化设计方案。通过合理优化结构,或采用新技术、新材料、新工艺等手段,改进产品薄弱点设计,提高整个系统可靠性,延长产品使用寿命。

(3) 产品智能化。借助人工智能和专家系统,提升产品控制系统智能化水平。通过虚拟煤层建模、截割轨迹预测、采煤机精准定位和智能控制,进一步提升采掘装备智能化水平。

(4) 产品系统化。将采掘装备产品设计扩展到整个产品生命周期,运用并行工程引导企业进行新产品的生产改革与管理,运用模块化设计、相似性设计来迎合不断变化的社会需求,运用逆向工程技术来吸收并掌握世界先进技术,形成完整的产品绿色设计系统。在设计中考虑制造、包装、运输、维修、回收、成本等因素,以定量的市场分析、经济分析和价值分析来支撑设计过程中原理方案、结构方案和选型方案的确定。

(5) 绿色设计信息数据库建设。借助互联网+设备全生命周期管理系统设计技术和经验,构建采掘装备从设计开发到回收利用的绿色设计平台,建立具有行业代表性的绿色设计信息数据库,积极构建绿色设计众创平台,推进绿色设计资源的共建共享。

1.2.2 制造工艺绿色化

以采掘装备关键零部件(如齿轮、超大型壳体等)为核心,对其生产工艺过程进行绿色改造。绿色制造工艺技术路线如图5所示。

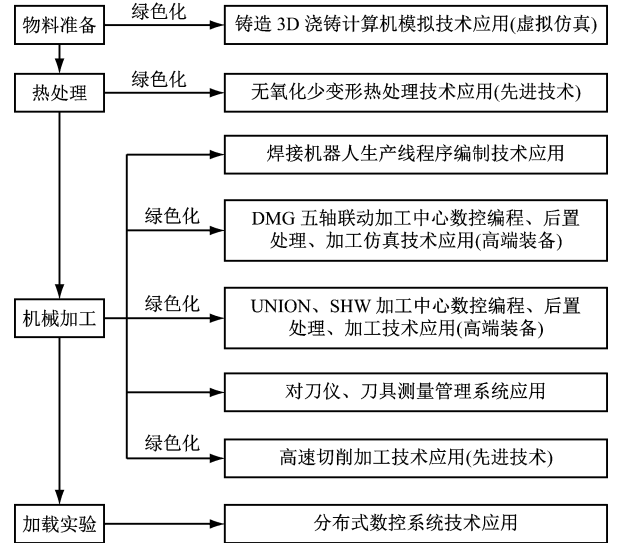


图5 绿色制造工艺技术路线

Fig. 5 Green manufacturing technical route

绿色制造工艺关键技术包括多用炉无氧化少变形热处理技术,焊接机器人生产线程序编制技术,

DMG 五轴联动加工中心的数控编程、后置处理及加工仿真技术,分布式数控系统技术,对刀仪、刀具测量管理系统,高速小切深小切削量技术,铸钢件铸造计算机模拟技术等。通过上述技术的产业应用实践,以保证生产质量为前提,缩短生产周期,提高零部件制造成功率和材料利用率,大幅降低生产成本。

1.2.3 激光熔覆修复再制造技术

矿山采掘工作环境恶劣,机械部件长期重载且承受大的冲击载荷,行走部齿轨轮、滑靴、壳体等零部件磨损严重,是井下生产中的常规易损件。不断截割使截齿承受较大的剪切应力、压应力和冲击载荷,截齿表体温度大幅提升,截齿表体形式出现多样化改变,最终损坏。在不影响基体性质前提下,激光熔覆修复再制造技术可以改善基体材料表面的耐磨、耐蚀、耐热及抗氧化等性能。该技术的应用可有效提高关键零部件的重复使用率,减少资源浪费,降低生产成本。

1.2.4 掘进系统智能化

针对人为操作困难、测量精度不高造成的掘进效率低、巷道成型质量不佳及截割头故障率增加等问题,利用视觉测量技术研制掘进机可视化辅助截割系统^[17],提高采掘装备使用率,降低故障率,减少能源消耗,实现采掘装备的自动化、智能化。可视化辅助截割引导界面如图 6 所示。

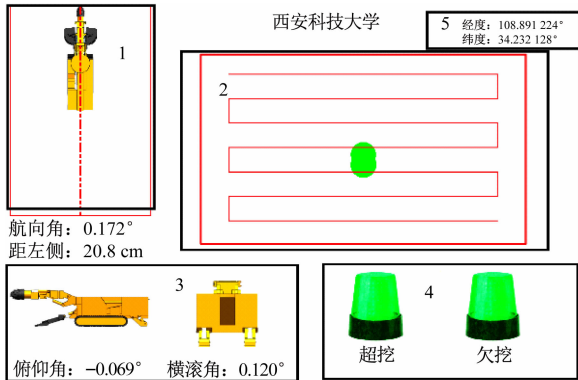


图 6 可视化辅助截割引导界面

Fig. 6 Guide interface of visual auxiliary cutting

1.2.5 状态监测与故障诊断

目前煤矿对采掘装备远程监测、监控与诊断应用不足,且缺乏对现场设备故障诊断和运行维护的决策支持等。针对上述问题,建设智能采掘装备远程诊断系统,提高采掘装备设计、制造、状态监测及维护过程的信息化水平和全生命周期服务能力,实现采掘装备的数字化、网络化和智能化^[18]。

2 采掘装备绿色设计评价

以采煤机为例,依据全生命周期理念对其进行绿色设计分析并构建评价体系,减少物质和能源消

耗及有害物质排放,并提高产品再利用率及再制造率。

2.1 采煤机生命周期评价

生命周期设计(Life Cycle Design, LCD)是从产品性能、环境保护、经济可行性的角度,考虑产品开发全生命周期。为了定量评价 LCD 对产品的影响,逐步产生了评估方法和工具,即生命周期评价(Life Cycle Assessment, LCA),用于评估产品在整个生命周期(从原材料获取、产品生产直至产品使用后的处置)中对资源和环境的影响,并提供改进指导原则。因此 LCA 被认为是支持绿色产品设计的核心工具。

采煤机 LCA 不仅是对关键技术及关键环节绿色化改进的量化评估,也是不断优化产品、提高其生产质量的重要手段之一。基于 LCA 的采煤机绿色设计方案评价根据方案绿色度判断当前设计是否满足绿色要求,并将各环节评估结果不断反馈,根据反馈结果不断优化设计方案,如图 7 所示。

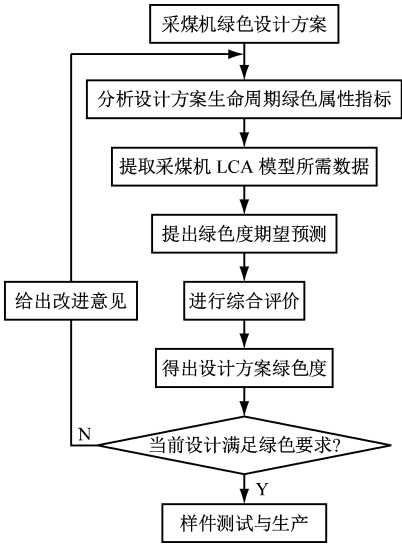


图 7 采煤机绿色设计方案评价过程

Fig. 7 Evaluation process of green design scheme of shearer

2.2 采煤机绿色设计评价指标体系构建

采煤机绿色设计评价指标体系的目标在于保证采煤机在设计阶段具有良好的绿色性,其结果可以反映设计方案的优劣。递阶层次评价模型的建立不仅有助于描述绿色特征层次关系,而且能评价产品有关指标与任务。为了简化流程,以三层结构问题为研究对象,依据采煤机要求与特性建立基于递阶层次模型的采煤机绿色设计评价指标体系,如图 8 所示。从资源、人机、能源、环境、经济、技术六大属性出发,对指标体系进行分析。

2.3 采煤机环境影响评价

根据《环境管理——生命周期评估:原则与框架》可知,对于整个生命周期,采煤机环境影响评价

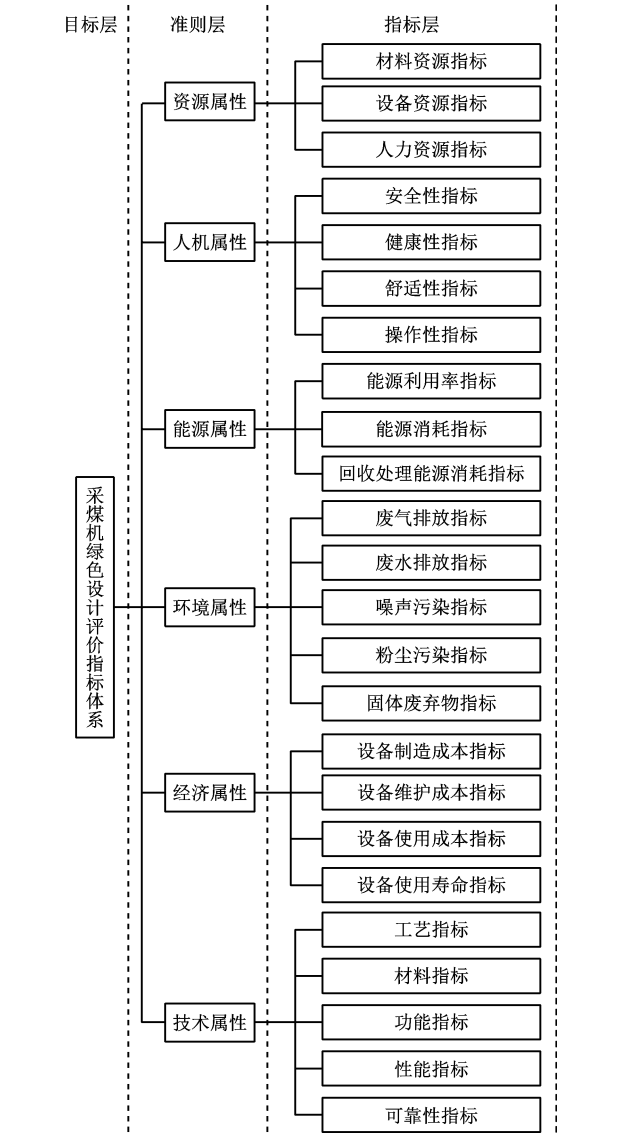


图 8 基于递阶层次模型的采煤机绿色设计评价指标体系
Fig. 8 Evaluation index system of green design of shearer based on hierarchical model

可按照 4 个步骤进行,即目标和范围界定、清单分析、影响评估和结果解释。LCA 基本技术框架如图 9 所示。根据研究目标和范围界定,分析采煤机整个生命周期过程对环境的影响,为采煤机绿色制造提供相应的理论依据。随后收集采煤机各零部件在生命周期各个阶段的输入(如金属、橡胶、塑料、电能等)和输出(如废气、废水、固体废弃物等)数据,并进行清单分析及影响评估。

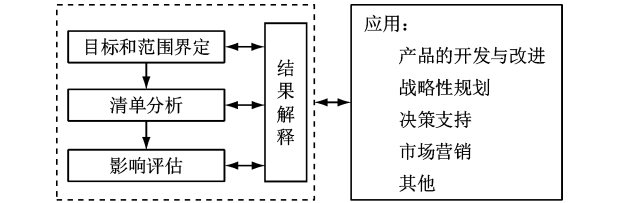


图 9 LCA 基本技术框架
Fig. 9 Basic technical framework of LCA

基于 LCA 的采煤机环境影响评价技术路线如图 10 所示。采用生命周期分析法研究采煤机生命周期环境影响因素。首先,分析采煤机的环境排放与物质流清单,并运用采煤机绿色设计评价指标体系对划分结论实行特征化处理;其次,对处理结果进行量化评估;最后,运用 LCA 专业软件平台 eFoot-print 进行产品全生命周期模型建立、环境影响计算及分析。

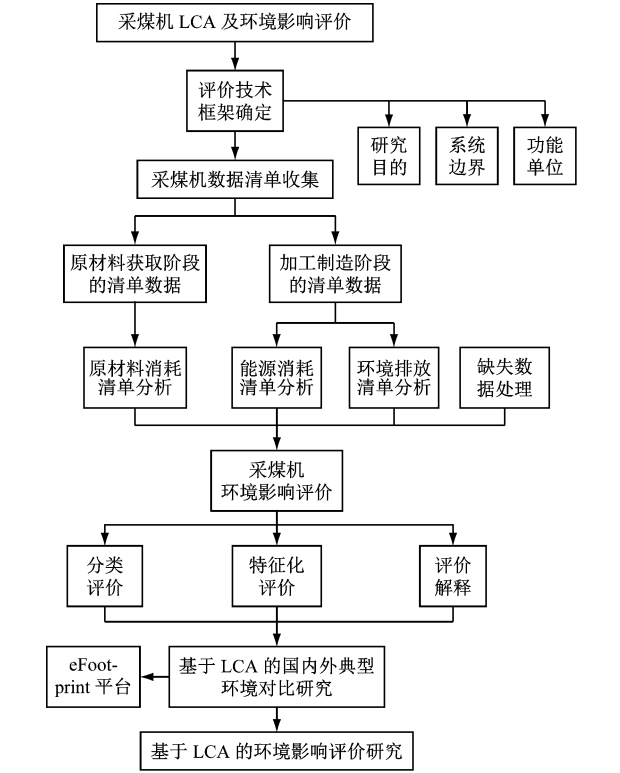


图 10 基于 LCA 的采煤机环境影响评价技术路线
Fig. 10 Technical route of environmental impact assessment of shearer based on LCA

3 采煤机绿色设计信息数据库建立

对于大型采掘装备,建立相应的数据库是满足其绿色设计需求的关键,为产品 LCD 及 LCA 提供重要的数据支撑。

基于采煤机全生命周期的绿色设计特征属性数据及 LCA 清单数据分析,提出了构建面向采煤机全生命周期的绿色材料数据库、绿色工艺数据库、环境数据库及绿色评价数据库,如图 11 所示。

在清单数据收集过程中,对采煤机进行过程分析,得到详细的单元数据。基于我国 LCA 基础数据库,不断整理更新并建立煤矿行业数据库。

采煤机绿色设计信息数据库的建立便于今后对不同型号采掘装备进行 LCA,同时为采掘装备绿色设计平台建设提供重要支撑,是采掘装备绿色设计标准的基础。

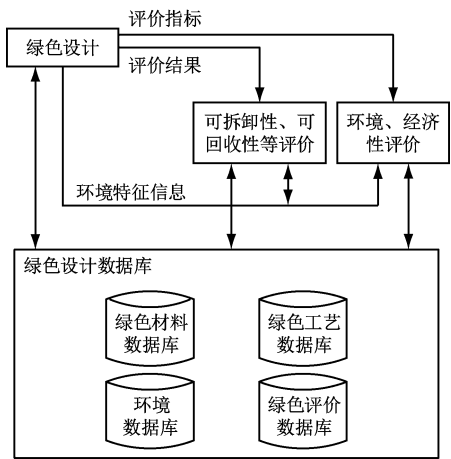


图 11 采煤机绿色设计信息数据库架构
Fig. 11 Database framework of green design information for shearer

4 结语

为促进煤矿开采的可持续发展,将环境保护、资源节约、高安全性等现代绿色设计理念充分融入到采掘装备产品设计与制造中。采掘装备绿色设计是煤炭开采智能化发展的必然,以绿色设计与评价为关键技术环节,以绿色设计信息数据库为支撑,建立绿色设计平台,有助于实现产品绿色化,提高生产质量,是实现煤炭开采智能化、资源合理利用、生态经济协调发展的核心环节,对推进煤炭行业绿色设计资源的共建共享及增强行业绿色化设计的示范作用具有重要意义。

参考文献 (References):

[1] 李克强. 政府工作报告[N]. 人民日报, 2015-03-17 (1).
LI Keqiang. Government work report[N]. People's Daily, 2015-03-17(1).

[2] 魏思祥. 高瓦斯千米深井安全高效绿色开采技术研究[J]. 煤炭科学技术, 2017, 45(8): 85-89.
WEI Sixiang. Study on safety and high efficient and green mining technology in high gassy coal mine with depth of 1 000 m[J]. Coal Science and Technology, 2017, 45(8): 85-89.

[3] 杨俊哲, 陈苏社, 王义, 等. 神东矿区绿色开采技术[J]. 煤炭科学技术, 2013, 41(9): 34-39.
YANG Junzhe, CHEN Sushe, WANG Yi, et al. Green mining technology of Shendong mining area[J]. Coal Science and Technology, 2013, 41(9): 34-39.

[4] 张科学, 李首滨, 何满潮, 等. 智能化无人开采系列关键技术之一——综采智能化工作面调斜控制技术研究[J]. 煤炭科学技术, 2018, 46(1): 139-149.
ZHANG Kexue, LI Shoubin, HE Manchao, et al. Study on key technologies of intelligent unmanned

coal mining series I: study on diagonal adjustment control technology of intelligent fully-mechanized coal mining face[J]. Coal Science and Technology, 2018, 46(1): 139-149.

[5] 缪海宾. 大型露天煤矿绿色开采理论与评价方法[J]. 煤矿安全, 2017, 48(9): 230-233.
MIAO Haibin. Theory and evaluation method of green mining in large open-pit coal mine[J]. Safety in Coal Mines, 2017, 48(9): 230-233.

[6] 范建. 基于产品多生命周期的煤机装备再制造性评估研究[D]. 北京: 北京科技大学, 2016.
FAN Jian. Assessment of remanufacturability for coal machinery based on PML theory[D]. Beijing: University of Science and Technology Beijing, 2016.

[7] 金伟良, 王竹君. 工程结构全寿命设计绿色指标体系构建[J]. 建筑结构学报, 2018, 39(3): 120-129.
JIN Weiliang, WANG Zhujun. Green indicator system in life-cycle design of engineering structures[J]. Journal of Building Structures, 2018, 39(3): 120-129.

[8] 金樾, 熊宇, 邓瑞妍, 等. 日本绿色建筑全生命周期评价方法研究[J]. 建筑经济, 2016, 37(2): 95-99.
JIN Yue, XIONG Yu, DENG Ruiyan, et al. Study on Japanese life cycle assessment of green building[J]. Construction Economy, 2016, 37(2): 95-99.

[9] 鲍宏, 刘志峰, 胡迪, 等. 应用 TRIZ 的主动再制造绿色创新设计研究[J]. 机械工程学报, 2016, 52(5): 33-39.
BAO Hong, LIU Zhifeng, HU Di, et al. Research on green innovation design method of active manufacturing using TRIZ[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2016, 52(5): 33-39.

[10] 孟强, 李方义, 李静, 等. 基于绿色特征的方案设计快速生命周期评价方法[J]. 计算机集成制造系统, 2015, 21(3): 626-633.
MENG Qiang, LI Fangyi, LI Jing, et al. Green features-based rapid life cycle assessment method for conceptual design[J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2015, 21(3): 626-633.

[11] 施平, 赵友军, 苟苟. 提高采煤机滚筒综合性能的研究[J]. 煤矿机械, 2011, 32(6): 100-102.
SHI Ping, ZHAO Youjun, GOU Ke. Research on improving combination property of shearer drum[J]. Coal Mine Machinery, 2011, 32(6): 100-102.

[12] 张旭辉, 陈利, 马宏伟, 等. 煤矿掘进机器人虚拟仿真与远程控制系统[J]. 工矿自动化, 2016, 42(12): 78-83.
ZHANG Xuhui, CHEN Li, MA Hongwei, et al. Virtual simulation and remote control system for coal mine roadheader robot[J]. Industry and Mine Automation, 2016, 42(12): 78-83.

[13] 张旭辉, 王妙云, 张雨萌, 等. 数据驱动下的工业设备

- 虚拟仿真与远程操控技术研究[J]. 重型机械, 2018(5):14-17.
- ZHANG Xuhui, WANG Miaoyun, ZHANG Yumeng, et al. Virtual simulation and remote control technology with data-driven for industrial equipment [J]. Heavy Machinery, 2018(5):14-17.
- [14] 穆润青, 宋振铎, 袁智, 等. 矿用圆环链数学建模和仿真分析[J]. 煤矿机械, 2017, 38(8):160-161.
- MU Runqing, SONG Zhenduo, YUAN Zhi, et al. Mathematical modeling and simulation analysis of mining ring chain[J]. Coal Mine Machinery, 2017, 38(8):160-161.
- [15] 赵友军, 刘志铭, 赵书斐, 等. 基于 ANSYS 的链传动采煤机链轮力学特性分析[J]. 科学技术创新, 2017(23):58-59.
- ZHAO Youjun, LIU Zhiming, ZHAO Shufei, et al. Analysis of mechanical characteristics of chain drive coal miner sprocket based on ANSYS[J]. Scientific and Technological Innovation, 2017(23):58-59.
- [16] 王力, 赵友军, 李钰. 薄煤层采煤机单轮行走箱导向滑靴的结构设计与分析[J]. 煤矿机电, 2012(6):78-80.
- WANG Li, ZHAO Youjun, LI Yu. Structure design analysis of guide-slipper on single wheel walking box for thin seam shearer [J]. Colliery Mechanical & Electrical Technology, 2012(6):78-80.
- [17] 杨文娟, 张旭辉, 马宏伟, 等. 悬臂式掘进机机身及切割头姿态视觉测量系统研究[J]. 煤炭科学技术, 2019, 47(6):50-57.
- YANG Wenjuan, ZHANG Xuhui, MA Hongwei, et al. Research on position and posture measurement system of body and cutting head for boom-type roadheader based on machine vision[J]. Coal Science and Technology, 2019, 47(6):50-57.
- [18] 张旭辉, 姚闯, 刘志明, 等. 面向自动化工作面的电牵引采煤机控制系统设计[J]. 工矿自动化, 2017, 43(4):1-5.
- ZHANG Xuhui, YAO Chuang, LIU Zhiming, et al. Design of control system of electric traction shearer oriented automatic working face [J]. Industry and Mine Automation, 2017, 43(4):1-5.