

DOI: 10.13228/j.boyuan.issn0449-749x.20220645

汽车钢板生产的生命周期评价

朱帅康^{1,2}, 龚先政^{1,2}, 高峰^{1,2}, 刘宇^{1,2}

(1. 北京工业大学材料与制造学部, 北京 100124; 2. 工业大数据应用技术国家工程实验室, 北京 100124)

摘 要: 在“碳达峰、碳中和”的驱动下,汽车制造业是节能减碳的重要组成部分,作为资源能源密集型产业,它采用汽车钢板作为主要材料,具有生产能耗和排放高的典型特点。采用生命周期评价(life cycle assessment, LCA)方法,分别对汽车钢板生产长流程工艺(BF-BOF)和短流程工艺(EAF)2种生产工艺的各阶段进行环境影响评价和贡献分析。结果表明,在汽车钢板生产长流程工艺(BF-BOF)中,炼铁工序和烧结工序对总环境影响的贡献较大;在汽车钢板生产短流程工艺(EAF)中,炼铁工序和电炉炼钢工序对总环境影响贡献较大。汽车钢板生产 EAF 工艺的各类环境影响均低于 BF-BOF 工艺,环境影响优势较大的有全球变暖(GWP)、化石能源耗竭(FFP)、矿产资源耗竭(SOP)、淡水富营养化(FEP)、海洋富营养化(MEP)、淡水生态毒性(FETP)、人体致癌毒性(HTPc)、人体非致癌毒性(HTPnc)。BF-BOF 工艺和 EAF 工艺的矿产资源消耗铜当量分别为 85.6 kg/t 和 25.6 kg/t,综合能耗分别为 541 kg 和 265 kg,CO₂ 当量为 2 111.7 kg 和 1 054.9 kg。EAF 工艺的资源消耗、能源消耗、温室气体排放均优于 BF-BOF 工艺,分别低 70.1%, 51.0% 和 50.1%。EAF 工艺的 3 类环境损害均低于 BF-BOF 工艺,具有一定的环境优势。因此,在条件允许的情况下,增加 EAF 工艺的生产比例,将有助于汽车制造业和钢铁工业的低碳可持续发展。

关键词: 汽车钢板; 钢板生产; 环境影响评价; 生命周期评价; 能耗

文献标志码: A **文章编号:** 0449-749X(2023)05-0145-08

Life cycle assessment of automotive steel sheet production

ZHU Shuai-kang^{1,2}, GONG Xian-zheng^{1,2}, GAO Feng^{1,2}, LIU Yu^{1,2}

(1. Faculty of Materials and Manufacturing, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China;

2. National Engineering Laboratory of Industrial Big-Data Application Technology, Beijing 100124, China)

Abstract: Driven by "carbon peak and carbon neutrality", automobile manufacturing industry is an important part of energy saving and carbon reduction. As a resource and energy intensive industry, it uses automobile steel plate as the main material, which has the typical characteristics of high production energy consumption and emissions. The life cycle assessment (LCA) method was used to conduct environmental impact assessment and contribution analysis for each stage of the long process (BF-BOF) and short process (EAF) of automobile steel plate production. The results show that in BF-BOF, the iron making process and sintering process have greater contribution to the total environmental impact. In automotive steel plate production short process (EAF), iron making process and electric furnace steelmaking process contribute greatly to the total environmental impact. The environmental impacts of EAF process in automobile steel plate production are lower than those of BF-BOF process. Global warming (GWP), fossil energy depletion (FFP), mineral resource depletion (SOP), freshwater eutrophication (FEP), marine eutrophication (MEP), freshwater ecotoxicity (FETP), human carcinogenic toxicity (HTPc), and human non-carcinogenic toxicity (HTPnc) are the major environmental impacts. The copper equivalent of BF-BOF process and EAF process are 85.6 kg/t and 25.6 kg/t, respectively, and the comprehensive energy consumption is 541 kg/t and 265 kg/t, respectively. The carbon dioxide equivalent was 2 111.7 kg/t and 1 054.9 kg/t. The resource consumption, energy consumption and greenhouse gas emission of EAF process are better than those of BF-BOF process, which are 70.1%, 51.0% and 50.1% lower, respectively. The three types of environmental damage of EAF process are lower than that of BF-BOF process, which has certain environmental advantages. Therefore, if conditions permit, increasing the production proportion of EAF process will contribute to the low-carbon and sustainable development of automobile manufacturing and steel industry.

基金项目: 国家重点研发计划资助项目(2022YFC3901701); 国家自然科学基金创新研究群体资助项目(51621003)

作者简介: 朱帅康(1998—), 男, 硕士生; **E-mail:** zhushuaikang@emails.bjut.edu.cn; **收稿日期:** 2022-10-13

通信作者: 龚先政(1967—), 男, 博士, 教授; **E-mail:** gongxianzheng@bjut.edu.cn

Key words: automotive steel sheet; steel plate production; environmental impact assessment; life cycle assessment; energy consumption

2020 年 9 月 22 日,习近平总书记在第七十五届联合国大会郑重宣布中国二氧化碳排放量力争在 2030 年前达到峰值,努力争取在 2060 年前实现碳中和^[1]。汽车行业具有产业链长、涉及面广的特点^[2]。其碳排放高,已成为中国交通部门碳排放管理的重中之重,对实现“3060”双碳目标有重要作用。根据相关数据显示,2020 年中国汽车行业全生命周期总碳排放量达 12 亿 t,其中乘用车全生命周期碳排放量约为 6.7 亿 t,使用过程占据了碳排放量的 74%,汽车制造加工及回收过程占据 26%^[3]。

近年来,汽车行业在中国飞速发展。汽车制造业也成为了中国钢材消费较大的行业,中国汽车钢材消费量与汽车产量有密切关系。现如今,中国已经成为了世界最大的汽车生产国,也是世界最大的汽车消费国^[4]。根据统计数据,2020 年中国汽车保有量已达 2.81 亿辆,汽车产量为 2 523 万辆,销量为 2 531 万辆。其中主要是乘用车的产、销量占据大部分,分别为 1 999 万辆和 2 018 万辆^[5]。在汽车制造中,钢铁材料占比为 60%~70%,其中汽车钢板使用量占到整车钢铁材料用量的 50%左右。钢铁工业的生产的特点是生产能耗和排放高,随着国家和社会对低碳节能发展的关注以及报废汽车的增多,采用生命周期评价方法分析汽车钢板不同生产工艺的环境负荷对实现汽车制造业和钢铁行业绿色生产具有重要意义。

生命周期评价(life cycle assessment, LCA)方法是国际上通用的一种评价产品环境负荷的方法^[6-7],LCA 技术框架可归纳为 4 个组成部分:目的与范围的定义、清单分析、结果解释以及影响评价,在各行各业均被应用于评价产品的环境负荷影响。SUN Xin 等^[8]通过 LCA 方法比较了先进高强度钢板、铝以及碳纤维 3 种发动机罩的生命周期能耗和温室效应,得出铝具有最低的生命周期能耗和温室效应,碳纤维机罩的回收利用价值最优,行驶距离和材料的回收率对 3 种发动机罩的生命周期能耗和环境影响影响最大。马洋洋等^[9]利用生命周期评价软件 GaBi 对碳纤维、普通低碳钢、铝合金、镁合金的材料生产阶段 CO₂ 排放进行生命周期分析,得到普通低碳钢的生产具有最小的 CO₂ 排放,铝合金、镁合金对汽车轻量化发展具有重要意义。赵明楠等^[10]通过

LCA 方法和 CALCD 数据库对汽车白车身进行生命周期分析,得到对汽车白车身环境影响最大的是电力生产的间接排放和钢铁生产的排放。石俊锋等^[11]通过 LCA 方法以车身作为研究对象,对普通低碳钢、先进高强度钢、铝合金以及镁合金进行生命周期分析,得到在总里程为 25 万 km 的条件下,镁合金材料具有最低的能耗和 CO₂ 排放,先进高强度钢、镁合金和铝合金能成为汽车轻量化很好的代替材料。李峰等^[12]利用 LCA 方法对煤制氢技术的短流程工艺和传统长流程工艺进行分析,结果表明煤制氢技术的短流程工艺的环境排放明显优于传统长流程。刘涛等^[13]采用生命周期评价方法给出了产品结构、废钢用量等减排潜力的案例,为钢铁企业低碳发展提供参考。

综合上述研究现状可发现,多数研究都着手于不同材料之间的能耗碳排放比较,少数研究涉及到汽车钢板生产工艺之间的环境负荷分析,本研究基于 LCA 思想弥补和丰富了这方面的研究,重点研究汽车钢板长流程和短流程两种生产工艺的环境负荷以及能源资源和温室气体排放,为汽车制造业和钢铁行业的低碳可持续发展提供绿色选材方案和数据支撑。

1 研究对象和研究方法

1.1 系统边界、功能单位及主要数据来源

以汽车钢板为研究对象,研究的系统边界为汽车钢板生产长流程工艺(BF-BOF),包括焦化、烧结、球团、炼铁、炼钢、热轧、冷轧工序,和短流程工艺(EAF),包括炼铁、电炉炼钢、热轧、冷轧工序;以及相关原材料和能源的生产与运输,不包括汽车钢板使用阶段的资源能源消耗和环境影响。其生命周期系统边界如图 1 所示。功能单位定义为 1 t 冷轧汽车板产品。

汽车钢板生命周期的数据收集包括前景数据和背景数据的收集。前景数据也就是现场生产数据,即产品在每个工序的生产数据。本研究前景数据来源于国内某大型钢铁企业中冷轧汽车板现场调研数据、《清洁生产审核报告》和《环境影响评价报告》。该企业生产冷轧汽车钢板主要采用 BF-BOF 工艺(其中包括铁矿石和煤开采和精选、焦化、烧结、球团、炼铁、炼钢、轧钢工序)。该生产数据为企业冷轧

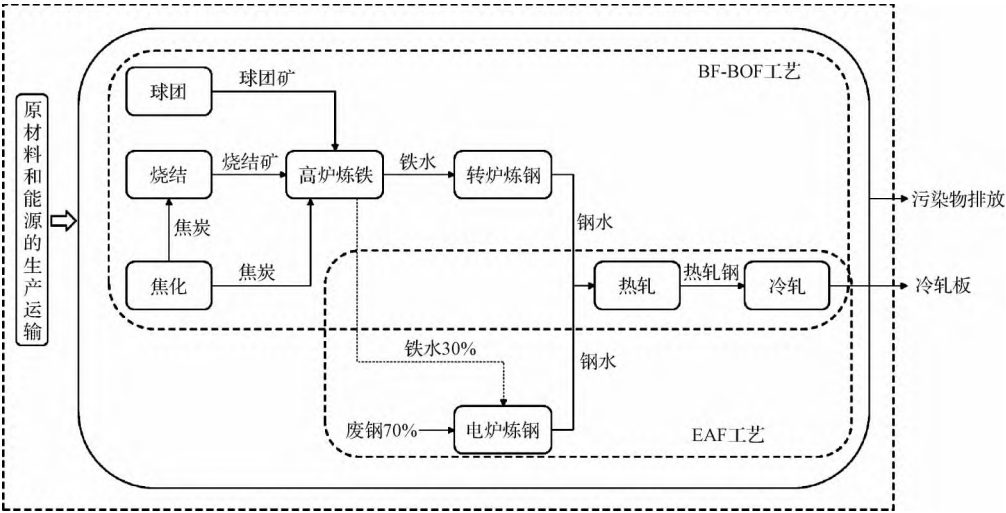


图 1 汽车钢板产品的生命周期系统边界

Fig. 1 Life cycle system boundary for automotive sheet product

汽车板的平均生产数据(表 1),数据质量较好,能够反映冷轧汽车板的真实生产水平。EAF 工艺数据参考中国某大型钢铁企业电炉炼钢实际生产活动数据。

表 1 生产功能单位冷轧汽车板活动水平数据

Table 1 Data of cold rolled steel sheet production per functional unit

项目	输入输出强度	项目	输入输出强度
洗精煤/(kg·t ⁻¹)	5.77×10 ²	转炉煤气/(GJ·t ⁻¹)	6.79×10 ⁻¹
铁矿石/(kg·t ⁻¹)	1.34×10 ³	高炉煤气/(GJ·t ⁻¹)	3.72×10 ⁰
返矿/(kg·t ⁻¹)	1.92×10 ²	焦炉煤气/(GJ·t ⁻¹)	1.73×10 ⁰
块矿/(kg·t ⁻¹)	7.89×10 ¹	电/(kW·h·t ⁻¹)	4.07×10 ²
锰矿/(kg·t ⁻¹)	7.08×10 ⁻²	冶金焦/(kg·t ⁻¹)	3.82×10 ²
废钢/(kg·t ⁻¹)	1.08×10 ²	焦粉/(kg·t ⁻¹)	3.91×10 ¹
中碳锰铁/(kg·t ⁻¹)	7.13×10 ⁻¹	烟煤/(kg·t ⁻¹)	5.62×10 ¹
硅铁/(kg·t ⁻¹)	6.11×10 ⁻¹	无烟煤/(kg·t ⁻¹)	1.39×10 ²
硅锰/(kg·t ⁻¹)	1.53×10 ⁰	CO ₂ /(kg·t ⁻¹)	2.00×10 ³
铌铁/(kg·t ⁻¹)	4.08×10 ⁻²	CH ₄ /(kg·t ⁻¹)	7.98×10 ⁻³
钛铁/(kg·t ⁻¹)	4.08×10 ⁻¹	N ₂ O/(kg·t ⁻¹)	3.40×10 ⁻³
膨润土/(kg·t ⁻¹)	2.66×10 ⁰	NO _x /(kg·t ⁻¹)	7.74×10 ⁻¹
生石灰/(kg·t ⁻¹)	1.11×10 ²	CO/(kg·t ⁻¹)	1.91×10 ⁰
石灰石/(kg·t ⁻¹)	8.52×10 ¹	NMVOC/(kg·t ⁻¹)	3.06×10 ⁻¹
白云石/(kg·t ⁻¹)	3.04×10 ¹	SO _x /(kg·t ⁻¹)	1.68×10 ⁰
菱镁石/(kg·t ⁻¹)	1.37×10 ¹	PM _{2.5} /(kg·t ⁻¹)	2.05×10 ⁻¹
增碳剂/(kg·t ⁻¹)	2.04×10 ⁻¹	Pb/(kg·t ⁻¹)	2.49×10 ⁻⁴
蒸汽/(GJ·t ⁻¹)	4.77×10 ¹	Cd/(kg·t ⁻¹)	3.35×10 ⁻⁶
压缩空气/(m ³ ·t ⁻¹)	9.04×10 ⁰	Hg/(kg·t ⁻¹)	1.80×10 ⁻⁵
氧气/(m ³ ·t ⁻¹)	1.02×10 ²	As/(kg·t ⁻¹)	8.04×10 ⁻⁶
氮气/(m ³ ·t ⁻¹)	1.11×10 ²	Cr/(kg·t ⁻¹)	2.52×10 ⁻⁵
氩气/(m ³ ·t ⁻¹)	4.73×10 ⁰	Cu/(kg·t ⁻¹)	3.25×10 ⁻⁵
水/(m ³ ·t ⁻¹)	2.75×10 ⁰	Ni/(kg·t ⁻¹)	2.42×10 ⁻⁵
循环水/(m ³ ·t ⁻¹)	5.09×10 ¹	Se/(kg·t ⁻¹)	3.70×10 ⁻⁶
脱盐水/(m ³ ·t ⁻¹)	2.10×10 ⁻¹		
除尘灰/(kg·t ⁻¹)	6.91×10 ⁰		

背景数据也就是系统边界内的原材料、能源的消耗以及环境排放数据。本研究中铁矿石的开采和精选清单数据来源于文献[14],煤炭的生产清单数

据参考孙博学^[15]的研究成果,石灰石开采阶段生命周期清单数据参考杨耀坤^[16]的研究结果,运输阶段主要考虑铁矿石和煤的运输,运输距离参考该钢铁

企业到最近矿场的距离,清单数据参考马丽萍^[17]和孙博学^[15]的研究结果,同时参考国家统计局^[18]对数据进行参考和补充。

1.2 能耗与碳排放计算方法

将生产功能单位冷轧汽车板所消耗的各种能源实物量,按照计算方法和单位折算后加和,即为生产功能单位冷轧汽车板总能耗。计算方法见式(1)。

$$E = \sum_{i=1}^n (E_i \times k_i) \quad (1)$$

式中: E 为生产功能单位冷轧汽车板总能耗; E_i 为消耗能源实物量; k_i 为折标煤系数; n 为能源消耗种类数。

汽车钢板生产 BF-BOF 工艺和 EAF 工艺中排放的温室气体主要是 CO_2 、 CH_4 、 N_2O , 温室气体的来源包括直接排放(钢板生产过程中燃料燃烧排放)和间接排放(电力等生产过程的排放)。燃料燃烧时,燃料中的碳被氧化成为 CO_2 排放到空气中,其排放量与燃料的用量、物理化学性质以及所使用的工艺设备有关,相关计算方法参考《IPCC 国家温室气体清单指南》,其估算方法为活动数据(燃料消耗量)乘以相应的排放因子,将其他温室气体排放量转化为 CO_2 当量,电力的生产排放清单以孙博学的研究为基础。

1.3 环境影响评价方法

本研究采用 ReCiPe2016 中间点和终点法对汽车钢板两种工艺生产进行环境影响评价。研究根据汽车钢板生产过程产生的污染物排放类型以及《钢铁产品制造生命周期评价技术规范(产品种类规则)》,确定共选用 13 类环境影响类型:全球变暖(global warming, GWP)、陆地酸化(terrestrial acidification, AP)、化石能源耗竭(fossil resource scarcity, FFP)、矿产资源耗竭(mineral resource scarcity, SOP)、淡水富营养化(freshwater eutrophication, FEP)、海洋富营养化(marine eutrophication, MEP)、光化学臭氧形成对人体健康的影响(human health ozone formation, HOFp)、光化学臭氧形成对生态系统的影响(ecosystem ozone formation, EOFp)、陆地生态毒性(terrestrial ecotoxicity, TETp)、淡水生态毒性(freshwater ecotoxicity, FETp)、颗粒物形成(fine particulate matter formation, PMFP)、人体致癌毒性(human carcinogenic toxicity, HTPc)、人体非致癌毒性(human non-carcinogenic toxicity, HTPnc);3 类终点环境损害:人体健康损害(damage to human health, HH)、生态

系统损害(damage to ecosystem quality, ED)以及资源可用性损害(damage to resource depletion, RA)。

中间点特征化是将工艺过程中不同的物质对环境造成的影响进行量化的过程。其计算过程是将工艺过程中各项的输入输出量,与其相对的特征化因子相乘,再将相同类型的环境影响进行相加得到其结果,特征化计算见式(2)。

$$C_{R,m} = \sum_{i=1}^p L_i \times C_{F,m} \quad (2)$$

式中: $C_{R,m}$ 为中点特征化结果; L_i 为输入输出清单; $C_{F,m}$ 为中点特征化因子; p 为输入输出物质数量。

终点特征化就是将选取的 13 种环境影响类型归纳到 3 类终点环境损害中,转化后加和所得。终点特征化因子($C_{F,ex,a}$)是由中点特征化因子($C_{F,mx}$)与对应的中点到终点转换因子 $F_{M \rightarrow E,a}$ 计算所得^[19],计算见式(3)。本研究终点特征化因子和中点到终点转换因子均选取于 ReCiPe2016 方法体系。环境影响贡献率是指对于一种环境影响中某工序的环境影响占该类环境影响总量的比例。

$$C_{F,ex,a} = C_{F,mx} \times F_{M \rightarrow E,a} \quad (3)$$

2 结果与讨论

2.1 BF-BOF 工艺环境负荷分析

按照特征化计算方法,BF-BOF 工艺特征化结果如图 2 所示,在汽车钢板 BF-BOF 工艺中,焦化工序的主要环境影响是 GWP、FEP、FFP,贡献率分别为 19.22%、16.56%、53.78%。烧结工序的主要环境影响是 PMFP、AP、MEP、TETp、SOP,贡献率分别为 42.48%、42.11%、43.28%、38.16%、85.65%。球团工序的主要环境影响是 SOP、MEP,贡献率为 14.0%、6.7%。炼铁工序的主要环境影响是 GWP、HOFp、EOFp、AP、FFP,贡献率分别为 35.05%、13.53%、13.49%、11.93%、23.36%。炼钢工序的主要环境影响是 FEP、MEP、FETp、HTPc、HTPnc,贡献率分别为 69.66%、40.59%、72.18%、91.86%、50.27%。热轧工序的主要环境影响是 GWP、HOFp、EOFp,贡献率分别为 13.76%、14.81%、14.62%。冷轧工序的主要环境影响是 HOFp、EOFp、TETp,贡献率分别为 21.70%、21.32%、17.27%。

BF-BOF 工艺各工序对总环境影响的贡献如图 3 所示。可以看出,炼铁工序的总环境影响最高,其次为烧结工序、炼钢工序、焦化工序、热轧工序、冷轧工序,球团工序的总环境影响最低。炼铁工序中骨

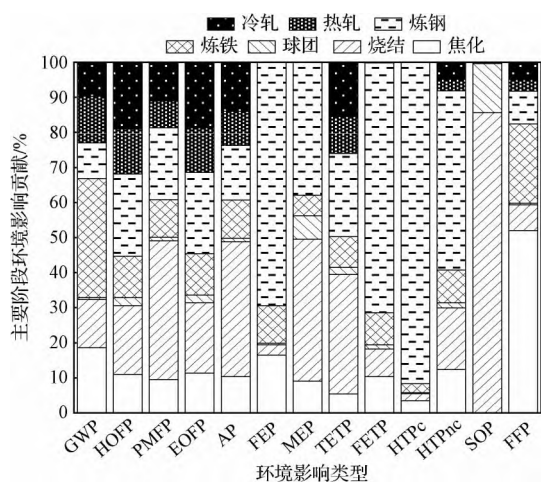


图 2 BF-BOF 工艺特征化结果

Fig. 2 BF-BOF process characterisation results

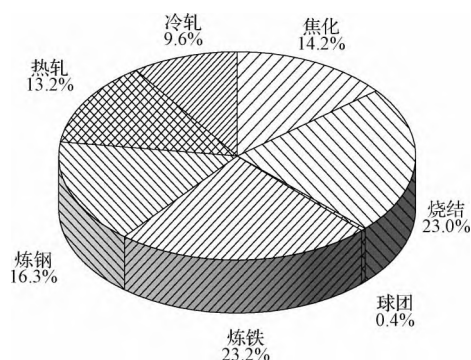


图 3 BF-BOF 工艺各工序对总环境影响的贡献

Fig. 3 Contribution of each process of BF-BOF process to total environmental impact

架的形成需要大量焦炭,同时此过程产生了大量污染物排放。烧结工序消耗了大量铁矿石,在烧结矿生产过程中,也会产生污染物排放。炼铁工序和烧结工序的环境影响均较高,对总环境影响的贡献分别达到 23.2% 和 23.0%。

2.2 EAF 工艺环境负荷分析

采用与 BF-BOF 方法相同的特征化计算,EAF 工艺特征化结果如图 4 所示,在汽车钢板 EAF 工艺中,铁水和电炉炼钢对环境的影响较大,炼铁阶段产生了大量的二氧化碳和其他污染物,电炉炼钢阶段消耗了大量电能,而目前中国以煤炭为主燃料的火力发电仍然占据首位,电力的生产会带来较大的环境影响,这也是该阶段对环境的影响较大的主要原因。EAF 工艺各工序对总环境影响的贡献如图 5 所示。由图 5 可知,电炉炼钢工序的总环境影响最高(32.0%)、其次是炼铁工序(26.1%)、热轧工序

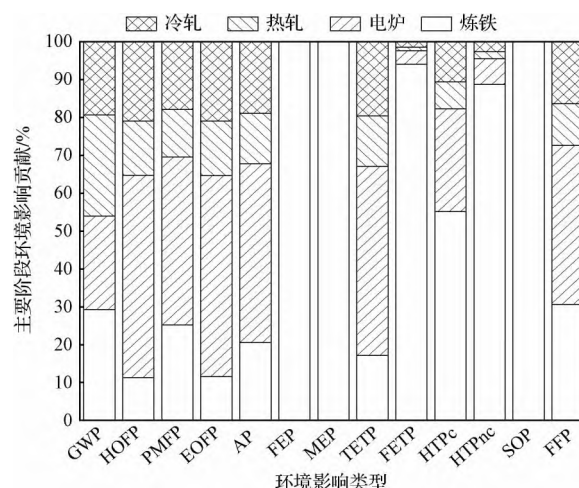


图 4 EAF 工艺特征化结果

Fig. 4 EAF process characterisation results

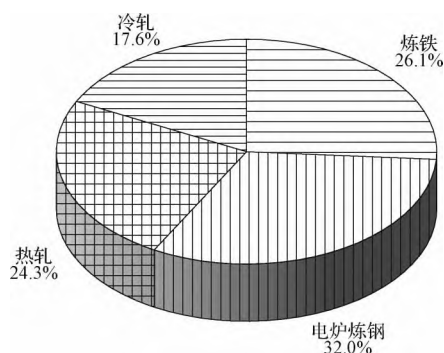


图 5 EAF 工艺各工序对总环境影响的贡献

Fig. 5 Contribution of each process of EAF process to total environmental impact

(24.3%)和冷轧工序(17.6%)。

2.3 两种生产工艺的环境影响对比分析

将 BF-BOF 工艺的环境影响作为基准,以百分比的形式对 BF-BOF 工艺和 EAF 工艺进行环境影响对比分析,如图 6 所示。

根据图 6 可知,汽车钢板 EAF 工艺的各类环境影响均低于 BF-BOF 工艺,因此,EAF 工艺相对于 BF-BOF 工艺有一定的环境优势。可以看出环境影响优势较大的有全球变暖(GWP)、淡水富营养化(FEP)、海洋富营养化(MEP)、淡水生态毒性(FETP)、人体致癌毒性(HTPc)、人体非致癌毒性(HTPnc)、矿产资源耗竭(SOP)、化石能源耗竭(FFP),分别只有 BF-BOF 工艺的 49.9%、4.3%、15.9%、5.8%、2.4%、0.4%、29.9%、30.1%。2 种生产工艺的环境损害评价结果如图 7 所示。由图 7 也可看出,EAF 工艺相比于 BF-BOF 工艺也具有环

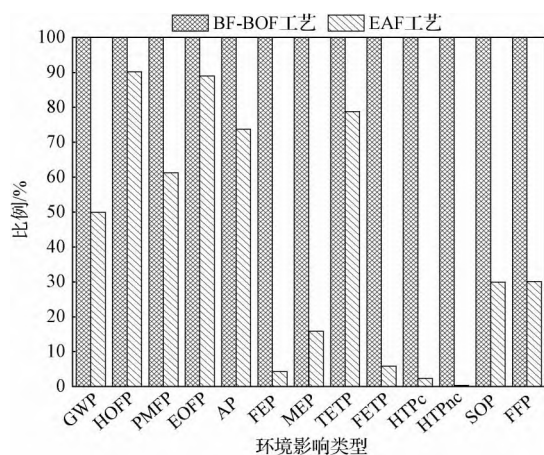


图 6 2 种生产工艺的环境影响对比分析

Fig. 6 Comparative analysis of the environmental impact of the two production processes

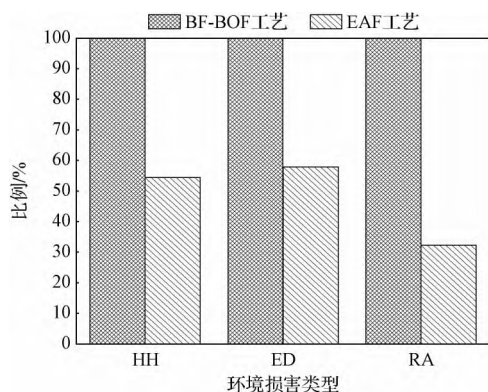


图 7 2 种生产工艺的环境损害评价结果

Fig. 7 Result of environmental damage assessment for two production processes

境优势, EAF 工艺的 3 类终点环境影响类型均低于 BF-BOF 工艺, 其环境优势由大到小为资源可用性损害(RA)、人体健康损害(HH)、生态系统损害(ED), 与 BF-BOF 工艺相比, 分别降低了 67.7%、45.6%、42.1%, 使用 EAF 工艺进行汽车钢板的生产具有明显的环境优势。

汽车钢板生产 EAF 工艺环境影响较小的主要原因是减少了铁矿石、煤和焦炭的使用量, 同时增加了废钢的使用量。

2.3.1 资源消耗

基于生命周期清单数据和特征化计算结果得到, BF-BOF 工艺和 EAF 工艺的资源消耗铜当量分别为 85.6 kg 和 25.6 kg。BF-BOF 工艺的资源消耗来自于烧结工序和球团工序, 这 2 个工序消耗了大量的铁矿石, EAF 工艺则是使用了 70% 的废钢和

30% 的铁水作为炼钢的原料, EAF 工艺相较于 BF-BOF 工艺的矿产资源耗竭(SOP)降低了 70.1%, 废钢材的使用减缓了铁矿石的资源消耗, 以此减少了原生矿物的开采和选取, 达到了节约资源的目的。

2.3.2 能源消耗

基于式(1)的能源消耗计算结果如图 8 所示。BF-BOF 工艺的总能耗为 541 kg, 其中高炉炼铁工序的能耗占比最高, 为 409 kg, 其次是烧结工序, 为 75.4 kg, 球团工序的能耗占比最低, 为 3.71 kg; 短流程工艺(EAF)的总能耗为 265 kg, 炼铁工序(30%)的能耗占比最高, 为 123 kg, 电炉炼钢工序占比最低, 为 37.8 kg。经过对比分析可知, BF-BOF 工艺和 EAF 工艺耗能最高的都是炼铁工序, 炼铁工序是汽车钢板生产生命周期能耗的主要来源, 炼铁工序能耗高, 主要原因是消耗了大量的焦炭和煤。而 EAF 工艺使用了 30% 的铁水和 70% 的废钢作为炼钢原料, 能耗降低非常明显。对于 2 种工艺的总能耗而言, EAF 工艺相比于 BF-BOF 工艺的能耗降低了近 50%, 基于以上分析可知, 废钢的使用量极大地降低了生产能耗, EAF 工艺在节约能耗方面的优势较为明显。

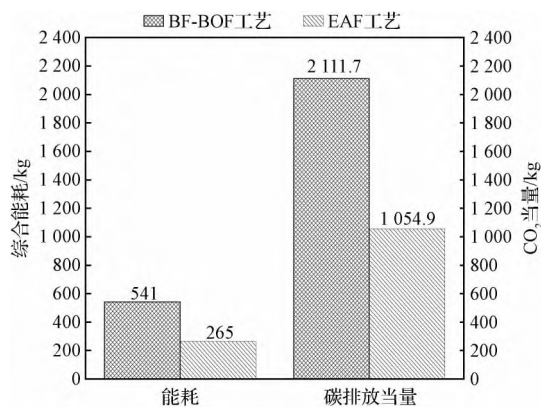


图 8 能耗及碳排放比较

Fig. 8 Comparison of energy consumption and carbon emission

2.3.3 温室气体排放

图 8 中给出了基于生命周期清单数据的计算 BF-BOF 工艺和 EAF 工艺生产单位产品碳排放当量对比。EAF 工艺的当量为 1 054.9 kg, 相比于 BF-BOF 工艺, 单位产品 CO₂ 当量降低了近 50%。根据图 2 和图 4 中环境影响 GWP 结果可知, BF-BOF 工艺中焦化、烧结、球团、炼铁、炼钢、热轧、冷轧的 CO₂ 当量分别为 392.9、289.3、13.3、716.6、213.9、281.5 和 204.2 kg, EAF 工艺中炼铁、电炉

炼钢、热轧、冷轧的 CO₂ 当量为 309.2、260.0、281.5 和 204.2 kg, BF-BOF 工艺中炼铁工序对碳排放贡献率最大,为 33.9%, BF-BOF 工艺中 EAF 工艺中铁水对碳排放的贡献率最大,为 29.3%。2 种生产工艺碳排放的主要贡献者都是炼铁工序,造成此结果的主要原因是炼铁工序的消耗了较多的焦炭以及其他能源,能源的使用过程产生了大量温室气体。

3 结论

(1) 对汽车钢板生产的长流程工艺(BF-BOF)和短流程工艺(EAF)进行生命周期环境影响负荷分析, BF-BOF 工艺的各工序环境影响: 炼铁工序 > 烧结工序 > 炼钢工序 > 焦化工序 > 热轧工序 > 冷轧工序 > 球团工序; EAF 工艺的各工序环境影响: 电炉炼钢工序 > 炼铁工序 > 热轧工序 > 冷轧工序。

(2) 汽车钢板 EAF 工艺的各类环境影响均低于 BF-BOF 工艺, 环境影响优势较大的有全球变暖(GWP)、淡水富营养化(FEP)、海洋富营养化(MEP)、淡水生态毒性(FETP)、人体致癌毒性(HTPc)、人体非致癌毒性(HTPnc)、矿产资源耗竭(SOP)、化石能源耗竭(FFP), 分别只有 BF-BOF 工艺的 49.9%、4.3%、15.9%、5.8%、2.4%、0.4%、29.9%、30.1%。

(3) EAF 工艺的 3 类环境损害均低于 BF-BOF 工艺, 使用 EAF 工艺进行汽车钢板的生产具有明显的环境优势。

(4) EAF 工艺分别在资源消耗、能源消耗和温室气体排放方面对于 BF-BOF 工艺都具有优势, 在各项条件的满足下, 优先使用 EAF 工艺会带来较高的环境效益。

参考文献:

[1] 姚同路, 吴伟, 杨勇, 等. “双碳”目标下中国钢铁工业的低碳发展分析[J]. 钢铁研究学报, 2022, 34(6): 505. (YAO Tong-lu, WU Wei, YANG Yong, et al. Analysis of low carbon development in China's iron and steel industry under the "double carbon" target[J]. Journal of Iron and Steel Research, 2022, 34(6): 505.)

[2] 乔英俊, 赵世佳, 伍晨波, 等. “双碳”目标下我国汽车产业低碳发展战略研究[J]. 中国软科学, 2022(6): 31. (QIAO Ying-jun, ZHAO Shi-jia, WU Chen-bo, et al. Research on low-carbon development strategy of China's automotive industry with the "Carbon-Peak and Carbon-Neutrality" goal[J]. China Soft Science, 2022(6): 31.)

[3] 中国汽车技术研究中心. 中国汽车低碳行动计划研究报告[R]. 天津: 中汽数据有限公司, 2021. (China Automotive

Technology Research Center. China Auto-motive Low Carbon Action Plan Research Report[R]. Tianjin: China Automotive Data Company Limited, 2021.)

[4] 康永林, 朱国明. 中国汽车发展趋势及汽车用钢面临的机遇与挑战[J]. 钢铁, 2014, 49(12): 1. (KANG Yong-lin, ZHU Guo-ming. Development trend of China's automobile industry and the opportunities and challenges of steels for automobiles[J]. Iron and Steel, 2014, 49(12): 1.)

[5] 彭孝仁. 我国汽车行业用钢市场分析[J]. 冶金经济与管理, 2021(6): 26. (PENG Xiao-ren. Analysis of steel market in China's automotive industry[J]. Metallurgical Economics and Management, 2021(6): 26.)

[6] International Standard Organization. ISO 14040: Environmental Management-Life CYCLE IMPACT ASSESSMENT-PRINciples and Frame-Word[S]. Geneva: ISO Standards Press, 2006.

[7] International Standard Organizaion. ISO14044: Environmental MANAGement-Life Cycle Impact Assessment-Requirements and Guidelines[S]. Geneva: ISO Standards Press, 2006.

[8] SUN Xin, LIU Jing-ru, LU Bin, et al. Life cycle assessment-based selection of a sustainable lightweight automotive engine hood design[J]. The International Journal of Life Cycle Assessment, 2017, 22(9): 1373.

[9] 马洋洋, 郝卓, 汪庆云. 基于生命周期评价的车身材料分析[J]. 汽车工程师, 2019(1): 11. (MA Yang-yang, HAO Zhuo, WANG Qing-yun. Analysis of body materials based on life cycle assessment[J]. Automotive Engineer, 2019(1): 11.)

[10] 赵明楠, 孙铎, 严玉廷. 基于 CALCA 的汽车白车身生命周期分析[J]. 中国人口·资源与环境, 2017, 27(s1): 181. (ZHAO Ming-nan, SUN Xin, YAN Yu-ting. Life cycle analysis of vehicle body-in-white based on CALCA[J]. China Population-Resources and Environment, 2017, 27(s1): 181.)

[11] 石俊峰, 符钢战, 施欢. 基于全生命周期评价的车身选材研究[J]. 上海汽车, 2017(1): 56. (SHI Jun-feng, FU Gang-zhan, SHI Huan. Research on body material selection based on whole life cycle assessment[J]. Shanghai Automotive, 2017(1): 56.)

[12] 李峰, 储满生, 唐珏, 等. 氢气基竖炉-电炉短流程环境影响分析[J]. 中国冶金, 2021, 31(9): 104. (LI Feng, CHU Man-sheng, TANG Jue, et al. Environmental impact analysis of hydrogen shaft furnace-electric furnace process[J]. China Metallurgy, 2021, 31(9): 104.)

[13] 刘涛, 刘颖昊, 周焯. 生命周期评价方法在钢铁企业低碳发展规划中的应用[J]. 中国冶金, 2021, 31(9): 130. (LIU Tao, LIU Ying-hao, ZHOU Ye. Application of life cycle assessment in low-carbon planning of iron and steel company[J]. China Metallurgy, 2021, 31(9): 130.)

[14] 李兴福, 徐鹤. 基于 GaBi 软件的钢材生命周期评价[J]. 环境保护与循环经济, 2009, 29(6): 15. (LI Xing-fu, XU He. Life cycle assessment of steel based on GaBi software[J]. Environmental Protection and Circular Economy, 2009, 29(6): 15.)

[15] 孙博学, 聂祚仁, 高峰, 等. 中国能源生产的累计需求分析

- [J]. 北京工业大学学报, 2013, 39(11): 1734. (SUN Bo-xue, NIE Zuo-ren, GAO Feng, et al. Cumulative exergy demand (CExD) analysis of energy production in China[J]. Journal of Beijing University of Technology, 2013, 39(11): 1734.)
- [16] 杨耀坤. 典型非金属矿物填料的生命周期评价[D]. 北京: 北京工业大学, 2012. (YANG Yao-kun. Life Cycle Assessment of Typical Non-Metallic Mining Fillers[D]. Beijing: Beijing University of Technology, 2012.)
- [17] 马丽萍. 材料生命周期评价基础之道路交通运输本地化研究[D]. 北京: 北京工业大学, 2007. (MA Li-ping. Study on the Localization of Road Traffic and Transportation Based on the Life Cycle Assessment of Materials[D]. Beijing: Beijing University of Technology, 2007.)
- [18] 国家统计局. 中国统计年鉴[M]. 北京: 中国统计出版社, 2020. (National Bureau of Statistics. China Statistical Yearbook[M]. Beijing: China Statistics Press, 2020.)
- [19] Mark A J Huijbregts, Zoran J N Steinmann, Pieter M F Elshout, et al. ReCiPe2016: A harmonised life cycle impact assessment method at midpoint and endpoint level[J]. International Journal of Life Cycle Assessment, 2016, 22(2): 1.

(上接第 144 页)

- [28] 张福明, 颀建新, 殷瑞钰. 钢铁制造流程炼铁区段耗散结构的解析[J]. 钢铁, 2022, 57(3): 1. (ZHANG Fu-ming, XIE Jian-xin, YIN Rui-yu. Analsis on dissipative structure of ironmaking procedure for iron and steel manufacturing process[J]. Iron and Steel, 2022, 57(3): 1.)
- [29] 韩伟刚, 胡长庆, 酃秀萍, 等. 炼铁-炼钢区段界面动态运行过程建模和仿真[J]. 中国冶金, 2019, 29(7): 17. (HAN Wei-gang, HU Chang-qing, LI Xiu-ping, et al. Modeling and simulation of dynamic operation process of ironmaking and steelmaking interface[J]. China Metallurgy, 2019, 29(7): 17.)
- [30] 张福明. 智能化钢铁制造流程信息物理系统的设计研究[J]. 钢铁, 2021, 56(6): 9. (ZHANG Fu-ming. Research and design on cyber physics system of intelligent iron and steel manufacturing process[J]. Iron and Steel, 2021, 56(6): 9.)
- [31] 吴双平, 徐安军. 钢铁生产流程的物质流仿真研究[J]. 钢铁, 2021, 56(8): 73. (WU Shuang-ping, XU An-jun. A review of mass flow simulation in steel production process[J]. Iron and Steel, 2021, 56(8): 73.)