

DOI:10.13228/j.boyuan.issn1006-9356.20210337

## 生命周期评价方法在钢铁企业低碳发展规划中的应用

刘涛<sup>1</sup>, 刘颖昊<sup>1</sup>, 周焯<sup>2</sup>

(1. 宝山钢铁股份有限公司中央研究院, 上海 201999; 2. 上海易碳数字科技有限公司, 上海 200439)

**摘要:** 在当前“碳达峰”“碳中和”的背景下,很多钢铁企业在制订低碳发展规划的过程中,对于减碳措施的减碳潜力没有数字化的概念,缺乏量化的评价手段和科学的数据支撑。为此,提出应用生命周期评价(LCA)进行钢铁企业低碳发展规划的方法,建立产品碳足迹与组织层级碳核算的关联。在此基础上,通过建立覆盖全公司的产品生命周期评价模型,以量化评估新技术新工艺应用、产品结构变化、能源结构变化、废钢利用率提升、节能减排改进、供应链优化等因素对于企业组织层面的碳减排绩效,可实现数字化碳减排路线图的描绘。给出了钢铁企业主要措施与策略碳减排潜力的评价方法与案例,可为钢铁企业的低碳发展规划提供参考。

**关键词:** 碳达峰; 碳中和; 低碳发展规划; 生命周期评价; 减排潜力; 数字化

**文献标志码:** A **文章编号:** 1006-9356(2021)09-0130-05

## Application of life cycle assessment in low-carbon planning of iron and steel company

LIU Tao<sup>1</sup>, LIU Ying-hao<sup>1</sup>, ZHOU Ye<sup>2</sup>

(1. The Central Research Institute of Baoshan Iron and Steel Co., Ltd., Shanghai 201999, China;

2. Shanghai E-C Digital Technology Co., Ltd., Shanghai 200439, China)

**Abstract:** In the current context of "carbon peak" and "carbon neutrality", many steel companies are formulating low-carbon plans. However, they have no digital concept on the potential of carbon reduction measures, and lack of quantitative evaluation methods and scientific data support. A method for applying life cycle assessment (LCA) to low-carbon planning for steel enterprises was proposed, and the relationship between product carbon footprint and organization-level carbon accounting was established. On this basis, through the company-wide product life cycle assessment model, it was possible to quantitatively evaluate the carbon emission reduction performance of the strategies such as the application of new technologies and new processes, product structure changes, energy structure changes, increased utilization of scrap steel, energy conservation and emission reduction, and supply chain optimization at the company organization level. In this way, the digital carbon emission reduction roadmap could be described. Examples of assessing the carbon emission reduction potential of various measures by LCA were listed, which provide reference for the low-carbon planning of steel companies.

**Key words:** carbon peak; carbon neutrality; low-carbon planning; life cycle assessment; emission reduction potential; digitalization

随着中国“碳达峰”“碳中和”目标的提出,各行业、企业逐步开展低碳发展规划工作。钢铁行业是中国经济发展重要支柱产业,同时也是碳排放重点行业,钢铁企业的“碳达峰”“碳中和”事关调整优化产业结构、能源结构、产品结构以及新技术的应用等方面,需要统筹谋划目标任务,科学制定行动方案。

很多钢铁企业在制定低碳发展规划的过程中,对于减碳的方法和途径有一些认识,但是对这些方法和途径的具体减碳潜力没有数字化的概念,局部的改进对全系统的减碳效果没有量化的评价手段,

低碳发展规划决策中缺乏科学的数据支撑。针对这些问题,郦秀萍等<sup>[1]</sup>从钢铁制造流程的物理本质出发,对碳素流在钢铁制造流程中的作用和转换形式、碳素流在钢铁制造流程的运行规律等进行深入分析,提出适合中国钢铁工业特点的CO<sub>2</sub>排放计算方法及减碳途径。张琦等<sup>[2]</sup>采用动态物质流分析方法,构建了钢需求量和废钢回收量预测模型,基于35项重点节能减排技术评估,结合能源消耗与CO<sub>2</sub>排放模型。以上研究主要是面向组织及过程层面开展的,本文提出了基于生命周期评价(Life Cycle

作者简介: 刘涛(1977—),男,硕士,高级工程师; E-mail: liutao237@baosteel.com; 收稿日期: 2021-06-11

Assessment, LCA) 方法的面向产品层面碳排放的钢铁企业低碳发展规划方法。

生命周期评价是一种面向产品的“从摇篮到坟墓”的环境管理方法和分析工具,是系统化地定量描述产品生命周期中的各种资源、能源消耗和环境排放并评价其环境影响的国际标准方法<sup>[3-4]</sup>,是国际上评价产品环境足迹(碳足迹、水足迹等)、绿色产品、绿色制造、绿色供应链、生态设计的科学方法。从其定义来看,LCA有3个特点:(1)面向产品;(2)数字化的定量分析;(3)生命周期全过程系统化的评价。因此,LCA能够数字化展现产品生命周期环境绩效,分析比较同一产品不同制造途径、不同产品实现同一功能的环境绩效;能够用于避免环境影响转移,包括从一个工序转移到另一个工序,从一种污染物转移到其他污染物。因此,应用生命周期评价方法可以科学、系统化、量化地对钢铁企业进行低碳发展规划。

## 1 建立产品碳足迹与组织碳排放的关联

目前对于企业碳排放的管理,一般有2种模式:

(1)面向组织层级的管理,对应的国际标准为ISO 14064-1:2018《组织层级温室气体排放和移除的量化报告规范指南》<sup>[5]</sup>,国内目前碳核算方法根据此标准进行了相应的简化,国家发改委发布的《中国钢铁生产企业温室气体排放核算方法与报告指南(试行)》,对中国钢铁生产企业温室气体排放量的核算和报告进行规范。(2)基于LCA的面向产品层面的管理,对应的国际标准为ISO 14067:2018《产品碳足迹-温室气体量化的要求和指南》<sup>[6]</sup>。

中国钢铁生产企业组织层级的碳核算边界包括了企业的直接排放及外购电力和热力带来的间接排放,核算方式为企业总进总出碳平衡,并不涉及具体工艺、工序细节。钢铁企业流程长、工序多,这种总进总出黑匣子式的核算方式,更多应用于国家对企业的碳排放管理,以及企业自身对总量的摸底,并不能有效指导钢铁企业细化减碳路线规划。

基于LCA的产品碳足迹则是根据产品的实际工艺路径进行核算,其计算逻辑为工序直接排放加上各次间接排放,按照GB/T 30052—2013《钢铁产品制造生命周期评价技术规范(产品种类规则)》<sup>[7]</sup>,可表达为

$$b_{T,F,g} = b_{F,g} + \sum a_{T,i} b_{i,g} \quad (1)$$

式中: $b_{T,F,g}$ 为以功能单位 $F$ 为基准的基本流 $g$ 的

累积量 $T$ ; $b_{F,g}$ 为以功能单位 $F$ 为基准的基本流 $g$ 在产品生产过程的直接流量; $a_{T,i}$ 为原燃料在产品系统中单元过程 $i$ 每功能单位的直接消耗量; $b_{i,g}$ 为基本流 $g$ 在单元过程 $i$ 的直接流量; $\sum a_{T,i} b_{i,g}$ 为以功能单位为基准的基本流 $g$ 在所有前景过程(foreground process,如原材料的开采过程、运输过程等)和所有后景过程(background process,如产品的使用过程、废弃物利用过程等)的累积量。

LCA的边界可根据实际情况确定,通常有:

(1)“从摇篮到坟墓(from cradle to grave)”,即产品全生命周期,包括资源、能源的开采、生产,加工,制造,使用和维护,废弃回收利用。

(2)“从摇篮到大门(from cradle to gate)”,即从资源、能源的开采、生产,到所研究产品的制造完成运出工厂大门这一过程。

(3)“从大门到大门(from gate to gate)”,从进工厂大门到出工厂大门,即制造阶段。

对于钢铁产品,由于下游用途广泛,针对特定用户才能开展“从摇篮到坟墓”的研究。因此,钢铁企业普遍开展“从摇篮到大门”的LCA,即从铁矿石、煤炭等原料、燃料开采、运输,经过焦化、烧结等原料加工工序,炼铁、炼钢、轧钢及热处理等制造工序,到形成钢铁产品的过程。

LCA面向的对象是产品,产品是碳排放的载体。全流程、全系统的变化,如能源结构变化、能源效率提升、成材率提升、新技术应用等,都能反映到产品碳排放的变化。产品碳足迹的变化,需要与组织层级的碳核算建立关联,将细化的LCA碳足迹结果与钢铁企业总体碳排放关联,这样才能指导低碳路线规划。根据LCA与组织层级碳核算计算逻辑与边界的分析比较,可采用式(2)建立关联。

$$E = \sum (p_i \cdot LCA_{CO_2,i}) \quad (2)$$

式中: $E$ 为LCA系统边界内碳排放总量; $p_i$ 为产品 $i$ 的外销量(离开系统边界); $LCA_{CO_2,i}$ 为产品 $i$ 的LCA结果中 $CO_2$ 排放量。

式(2)表达的物理意义在于,离开系统边界的所有碳排放载体承载的碳排放总和,内部利用的中间产品不计入计算。例如生产的热轧卷一部分外卖,一部分用于冷轧产品生产,而用于冷轧的中间产品不计入式(2)计算。

根据《中国钢铁生产企业温室气体排放核算方法与报告指南(试行)》(简称《指南》)中的核算边界,式(2)可细化为

$$E_s = \sum [p_i \cdot (LCA_{CO_2, scope1, i} + LCA_{CO_2, scope2, i})] \quad (3)$$

式中： $E_s$ 为按《指南》边界的钢铁企业碳排放总量； $p_i$ 为产品*i*的外卖量(离开系统边界)； $LCA_{CO_2, scope1, i}$ 为产品*i*的 LCA 结果中 gate-to-gate 边界内的  $CO_2$  排放量； $LCA_{CO_2, scope2, i}$ 为产品*i*的 LCA 结果中外购电力与热力边界带入的  $CO_2$  排放量。

## 2 LCA 在钢铁企业低碳发展规划中的应用

通过建立覆盖全公司的产品生命周期评价模型,可量化评估新技术新工艺应用、产品结构变化、能源结构变化、废钢利用率提升、节能减排改进、供应链优化等因素的碳减排绩效,如图 1 所示。

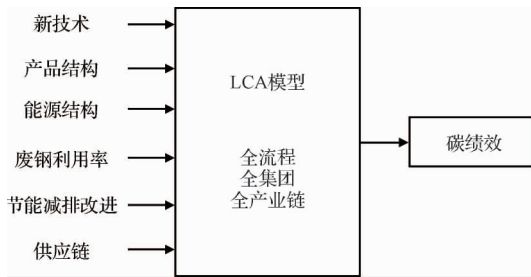


图 1 LCA 量化评估各措施与策略的碳减排潜力  
Fig. 1 Quantitatively assess carbon emission reduction potential of various measures and strategies by LCA

### 2.1 新技术新工艺应用的碳减排潜力评估

新技术新工艺的应用是 LCA 最常见的典型应用场景。LCA 的比较是建立在同功能单位基础上的比较,即在实现相同功能条件下,新技术新工艺对资源能源和环境排放的影响。图 2 所示为比较转炉炼钢与电炉炼钢这两条不同工艺路径的 LCA 分析,图中显示了不同工艺的产品碳足迹(每 kg 钢的  $CO_2$  排放量)构成,如有需要,还可进一步细化厂内部分的构成情况。

类似的分析可以用于低碳工艺应用后,预测减碳潜力及其详细构成情况,如氢基竖炉直接还原铁-电弧炉工艺与传统的高炉-转炉工艺的 LCA 模拟等。

### 2.2 产品结构对“碳达峰”的影响

有一种观点认为,钢铁行业“碳达峰”实际上就是钢产量达峰,这种观点在产品结构相对固定的情况下有一定道理,但是如果产品结构发生变化,深加工产品比例上升,同样钢产量的条件下,碳排放有可能大幅上升。LCA 结果显示,不同产品的碳足迹差

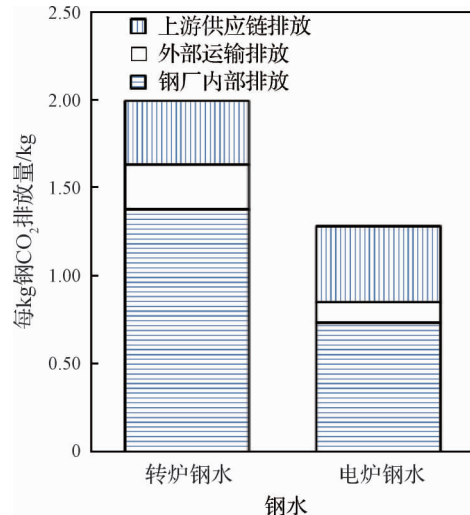


图 2 某钢厂转炉钢水与电炉钢水(加一定量铁水)的碳足迹比较

Fig. 2 Comparison of carbon emissions between BOF steel and EAF steel (with a certain proportion of hot metal) in a steel plant

异相当大。世界钢铁协会发布的 2020 年钢铁产品生命周期碳足迹全球平均值<sup>[8]</sup>见表 1,数据显示,不同的产品其碳足迹差异甚至达到近 1 倍,如果考虑取向硅钢、不锈钢等,其差异甚至可能超过 3 倍。因此,“碳达峰”规划必须要考虑产品结构带来的影响。

表 1 世界钢铁协会发布的钢铁产品碳足迹全球平均值节选 (“从摇篮到大门”)

型材	钢筋	热轧卷	彩涂
1.578	1.966	2.343	2.894

采用式(3)可动态模拟不同产品结构下企业总的碳排放变化情况,式中  $p_i$ 反映了产品结构,LCA 为企业产品结构与企业碳排放总量建立了关联,为企业调整与优化产品结构提供支撑。

### 2.3 能源结构对碳排放的影响

改变能源结构是碳减排、碳中和的重要途径,即在能源供应端,尽量采用非碳能源替代化石能源发电、制氢,构建绿色清洁的电力系统和能源供应系统。当然这个过程是漫长的,钢铁企业制定碳减排路线图的时候,须逐步规划各个阶段的减碳目标。在 LCA 模型中,可以通过调整能源的构成及其使用效率,建立能源使用与总体碳排放的联系,从而制定合理的调整能源结构减碳路线图。

钢铁厂常见的燃料单位热值的碳排放如图 3 所示(BFG 为高炉煤气,LDG 为转炉煤气,OY 炉煤气为欧冶炉煤气,LPG 为液化石油气,COG 为焦炉煤气)。从图 3 中可以看出,“煤改天然气”是降低碳排放的一个途径。LCA 研究表明<sup>[9]</sup>,钢铁企业现有工艺下,煤炭能源的 60% 以上主要作为还原剂等原料

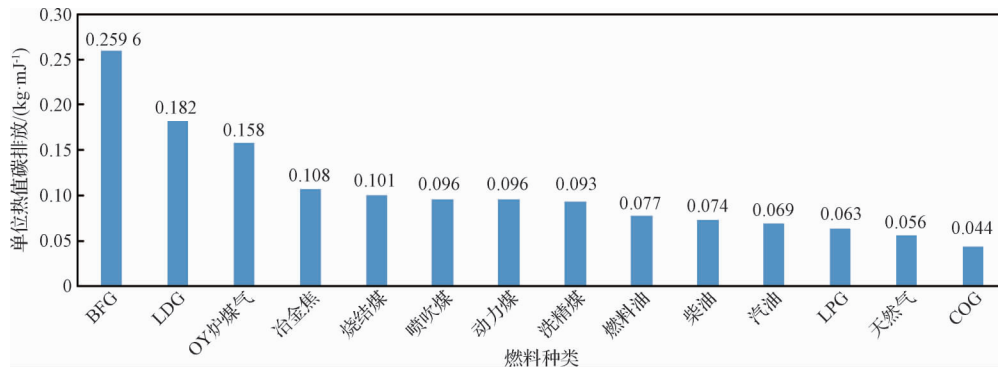


图 3 钢铁厂常见燃料单位热值的碳排放

Fig. 3 Carbon emissions per unit of calorific value for common fuels in steel plants

改变电力结构是钢铁企业减碳的重要方向,图 4 所示为各种电力的碳排放系数,其中电网数据来自于国家气候战略中心发布的 2012 年中国区域电网平均 CO<sub>2</sub> 排放因子(kg/(kW·h)),风电、光伏发电数据来源于商业数据库<sup>[10]</sup>。LCA 可模拟钢铁企业关闭燃煤电厂、外购电网电、外购绿电的减碳潜力。

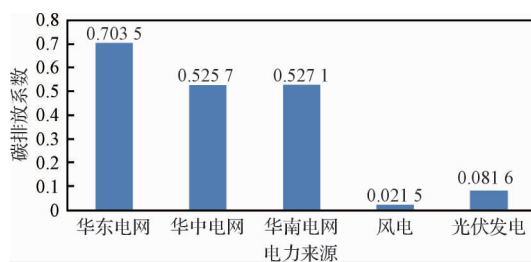


图 4 各种来源电力的碳排放

Fig. 4 Carbon emissions from various sources of electricity

#### 2.4 废钢利用率提升的减碳潜力预测

废钢利用率的提升对于减碳的效果是显著的,2.1 节中图 2 也反映了废钢利用的减碳收益。在评价废钢利用率提升的减碳效果时,应从生命周期视角考虑废钢产业链全过程,包括废钢铁回收、拆解、加工破碎、配送与应用等环节。由于废钢资源的供应还不能满足钢铁生产的需求,因此在做废钢利用率提升的低碳发展规划时,需要考虑废钢资源可获取性,逐步提升废钢利用率。

而非燃料,可进行“煤改天然气”的场合主要是电厂燃煤机组、高炉喷吹煤粉、焙烧喷吹煤粉等。与现状相比,电厂“煤改天然气”可实现碳排放降低 33%。混合煤气是钢铁企业副产资源的综合利用,如替换为天然气,则会造成副产煤气资源的浪费。

废钢利用率主要从 2 个方面提升:提高转炉废钢比、增加电炉炼钢比例。LCA 模拟提高转炉废钢比的情景中,可动态调整 LCA 模型中铁水与废钢的构成、废钢比提升后需要增加的补热剂等参数,从而构建废钢比提升与企业总体碳排放的关联。增加电炉炼钢比例的情景模拟中,在企业钢产量被限定的情况下,需要在 LCA 模型中保持电炉路径与转炉路径的总体钢产量的平衡。

LCA 模拟结果表明,对于钢铁企业的碳减排比例,废钢利用率的提升与企业产品结构相关,若后续深加工产品的比例较高,则冶炼系统碳排放比例相对较低,废钢比提升对于总体减碳比例也相对较低。

#### 2.5 供应链碳管理

从宝钢产品碳足迹构成分析,供应链及外部运输占钢铁产品碳足迹的 20%~30%,是钢铁产品碳足迹的重要组成部分。钢铁企业的低碳发展规划不能只关注企业内部的减碳,也应将供应链纳入其中,适当情况下也可以向供应商转移部分减碳压力,从而促进产业链的低碳化。

图 5 所示为对不同供应商的电极产品碳排放 LCA 分析,即到电炉钢水生产完成时,电极使用对电炉钢水生命周期碳排放的影响,可见不同供应商提供的产品不一样,碳排放情况也不一样。在钢铁企业,可通过建立供应商 LCA 绿色评价系统,建立与积累产品碳数据库,待数据积累到一定程度,可建

立绿色准入制度,逐步淘汰高碳排放产品。

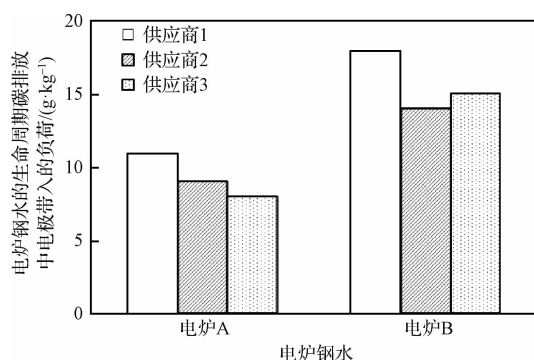


图 5 对电极不同供应商产品碳排放的比较

Fig. 5 Carbon emissions of electrodes from different suppliers

### 3 结论

(1)钢铁企业“碳达峰”“碳中和”路径规划应站在钢铁全产业链、产品生命周期全过程的高度,科学系统地制定减碳路线图。

(2)应用生命周期评价方法可以系统化、定量地对钢铁企业进行低碳发展规划。通过建立覆盖全公司的产品生命周期评价模型,可量化评价新技术新工艺应用、产品结构变化、能源结构变化、废钢利用率提升、节能减排改进、供应链碳管理与优化等因素的碳减排绩效,实现数字化碳减排路线图的描绘。

### 参考文献:

- [1] 郦秀萍,上官钦,周继程,等. 钢铁制造流程中碳素流运行与碳减排途径[M]. 北京:冶金工业出版社,2020.
- [2] 张琦,张薇,王玉洁,等. 中国钢铁工业节能减排潜力及能效提升途径[J]. 钢铁,2019,54(2):7.
- [3] International Standard Organization. Environmental management-Life cycle impact assessment-Principles and framework; ISO 14040: 2006 [S]. Geneva: ISO Standards Press, 2006.
- [4] International Standard Organization. Environmental management-Life cycle impact assessment-Requirements and guidelines; ISO 14044: 2006 [S]. Geneva: ISO Standards Press, 2006.
- [5] International Standard Organization. Greenhouse gases-Part 1: Specification with guidance at the organization level for quantification and reporting of greenhouse gas emissions and removals; ISO 14064-1: 2018 [S]. Geneva: ISO Standards Press, 2018.
- [6] International Standard Organization. Greenhouse gases-Carbon footprint of products-Requirements and guidelines for quantification; ISO 14067:2018[S]. Geneva: ISO Standards Press, 2018.
- [7] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局. 钢铁产品制造生命周期评价技术规范(产品种类规则);GB/T 30052—2013 [S]. 北京:中国标准出版社,2014.
- [8] World Steel Association. 2020 Life cycle inventory study report[R]. Brussels:The World Steel Association, 2020.
- [9] 刘涛,刘颖昊. 从生命周期评价视角看钢铁企业“煤改天然气”[J]. 冶金能源,2019,38(3):5.
- [10] 上海易碳数字科技有限公司. jimuLCA database[CP/DK]. 上海:上海易碳数字科技有限公司,2021.