

生命周期碳足迹评价助力钢铁企业降碳

苏丹,钱玺文,全魁,张尚宣

(中冶赛迪重庆环境咨询有限公司,重庆 400000)

【摘要】钢铁行业是我国“双碳”目标实现的主力军,推进钢铁行业绿色低碳转型刻不容缓。以某钢铁联合企业为例,针对具体钢产品,应用生命周期评价方法,详细测算了其从原材料开采到钢成品出厂全过程的碳足迹,分析钢铁产品生产及上下游降碳潜力,并从冶炼工艺变革、生产流程优化、系统能效提升、碳捕集利用、能源结构转换等方面,探讨切实可行的降碳路径,旨在推动钢铁行业及上下游产业链的低碳发展,为相关企业提供有益参考。

【关键词】碳足迹;生命周期;钢铁;降碳

【中图分类号】X322

【文献标识码】A

【文章编号】2095-2066(2023)09-0011-03

DOI:10.16844/j.cnki.cn10-1007/tk.2023.09.025

0 引言

积极应对气候变化,践行低碳发展已成为全球关注的焦点和各国共识。2030年前实现碳达峰、2060年前实现碳中和,是我国的重大战略决策。我国钢铁行业碳排放量占全球钢铁碳排放总量的60%以上,占全国碳排放总量的15%左右,因此推进钢铁行业低碳转型刻不容缓,亟须对钢铁产品生命周期碳足迹进行分析,探索钢铁企业的绿色低碳发展之路。

1 碳足迹计算方法

碳足迹的计算方法主要有两种:①以投入产出分析为代表的“自上而下”方法。②以生命周期评价为代表的“自下而上”方法。

我国钢铁行业主要依据《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)》《温室气体排放核算与报告要求 第5部分:钢铁生产企业》(GB/T 32151.5—2015)等文件中基于投入产出分析的方法来计算碳排放量。该方法虽然以企业为单位,考虑企业边界范围内的输入输出,但计算结果并不精确,只能掌握企业碳排放总量。而且该方法未考虑到企业内部的物质流转换、能源利用效率、工序界面损耗等因素,无法计算各工序、设备层面的碳排放量,并不能支撑企业内部的碳排放分析评价,而主要用于政府对企业的碳排放管理。

生命周期碳足迹评价则是以过程分析为基础的评价法,可用来评估某一产品在生命周期或服务过程中所排放的CO₂,其评价过程和结果比较详细和准确。这类方法对产品原材料采掘、原材料生产、产品制造、产品使用以及产品用后处理的全过程进行跟踪、定量分析与评价^[1]。相较于国内现行的碳核算方法,生命周期碳足迹评价可以扩展到产品、工序层面,更精准地计算企业内部碳足迹,为挖掘降碳潜力、规划降碳路径提供有力支撑。

2 生命周期碳足迹评价

本文以我国某钢铁联合企业高速线材产品为例,采用生命周期评价方法对该企业的碳足迹进行评价,该企业具备完整的钢铁生产工序,包含烧结、焦化、炼铁、炼钢、轧钢等工序。

2.1 计算方法

采用生命周期碳足迹评价方法,对原材料开采到产品制造全过程所涉及的全部原料、活动和过程进行计算^[2]。钢铁产品碳足迹计算公式如下:

$$CO_2_{\text{产品}} = CO_2_{\text{上游制造}} + CO_2_{\text{上游运输}} + CO_2_{\text{产品制造}}; \quad (1)$$

$$CO_2_{\text{产品}} = CO_2_{\text{化石燃料燃烧}} + CO_2_{\text{生产过程}} + CO_2_{\text{净购入电、热力}} + CO_2_{\text{原辅料}} + CO_2_{\text{固碳产品}}。 \quad (2)$$

式中:CO₂_{产品}——产品碳足迹;CO₂_{上游制造}——上游矿石采选、废钢回收碳足迹;CO₂_{上游运输}——上游运输碳足迹;CO₂_{产品制造}——产品制造过程碳足迹;CO₂_{化石燃料燃烧}——化石燃料燃烧排放量;CO₂_{生产过程}——生产过程排放量;CO₂_{净购入电、热力}——净购入使用的电力、热力排放量;CO₂_{原辅料}——生产过程中所使用原辅料隐含的排放量;CO₂_{固碳产品}——固碳产品隐含排放量。

对于钢铁产品生产过程中产生的相关副产品,其碳足迹抵扣采用系统扩展法和特征分配法,其中焦化副产品、水渣、钢渣按热值分配,高炉煤气、转炉煤气按系统扩展法替代天然气热值进行计算。

2.2 边界确定

边界确定是碳足迹计算的前提条件,不同的边界划分会影响碳足迹的计算结果^[3]。本文计算边界为“从摇篮到大门”,即从资源、能源的开采和生产,到钢铁产品的制造完成并运出工厂大门这一过程。

2.3 数据获取

钢铁企业数据来源有多种,包括发票、生产报表、财务统计报表与上报统计局报表等。本文生产互动数据来源于该企业2020年生产台账,并与其他数

据来源交叉核对无误。

2.4 排放因子选择

本文计算的排放因子均来源于《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)》及中国产品全生命周期温室气体排放系数库。

2.5 碳足迹评价

根据式(1)、式(2),计算得出该产品碳足迹为 2 550.90 kg CO₂/t,各物料碳足迹分布如表 1 所示,各工序碳足迹分布如表 2 所示。

表 1 各物料碳足迹分布

序号	物料类型	碳足迹/(kg CO ₂ ·t ⁻¹)	碳足迹占比/%
1	焦炭	748.77	29.35
2	洗精煤	425.41	16.68
3	高炉煤气	402.91	15.79
4	铁精矿	328.46	12.88
5	石灰石	136.03	5.33
6	电	125.22	4.91
7	生铁	89.23	3.50
8	无烟煤	82.90	3.25
9	焦炉煤气	59.85	2.35
10	铁水	48.50	1.90
11	转炉煤气	32.23	1.26
12	新水	22.77	0.89
13	石灰	10.95	0.43
14	氧气	8.59	0.34
15	蒸汽	7.35	0.29
16	废水处理	6.54	0.26
17	钢坯	5.18	0.20
18	废钢	3.15	0.12
19	氮气	2.86	0.11
20	压缩空气	1.66	0.07
21	合金	1.04	0.04
22	氢氧化钠	0.72	0.03
23	轧制油	0.33	0.01
24	洗油	0.25	0.01
合计		2550.90	100.00

表 2 各工序碳足迹分布

序号	工序	碳足迹/(kg CO ₂ ·t ⁻¹)	碳足迹占比/%
1	烧结	759.23	29.76
2	炼铁	517.93	20.30
3	采选	362.42	14.21
4	轧钢	313.18	12.28
5	焦化	238.25	9.34
6	运输	174.09	6.82
7	炼钢	128.33	5.03
8	公辅设施	55.93	2.19
9	废钢回收	1.57	0.06
合计		2550.93	100.00

由表 1 可知,在各物料中,焦炭、洗精煤、高炉煤气、铁精矿对产品碳足迹的影响较大,占比分别为 29.35%、16.68%、15.79%、12.88%。主要依据如下:①焦炭、洗精煤作为钢铁冶炼过程中的主要还原

剂和能量来源,对钢铁产品的碳足迹影响最大。②高炉煤气由于其产生量大,单位热值含碳量较焦炉煤气等更高,对产品碳足迹的影响较大。③铁精矿本身不产生碳排放,但在上游采选过程中碳排放量较高,故对产品碳足迹影响较大。

由表 2 可知,烧结、炼铁、采选、轧钢是对碳足迹影响最大的 4 个工序,占比分别为 29.76%、20.30%、14.21%、12.28%。结合表 1,烧结工序碳足迹主要来源于焦炭和高炉煤气;炼铁工序碳足迹主要来源于焦炭和无烟煤;采选工序碳足迹主要来源于洗精煤和无烟煤;轧钢工序碳足迹主要来源于高炉煤气。其中,炼铁工序由于高炉煤气的回收,碳足迹并非最高;不同矿山、矿石种类对上游采选碳足迹的影响较大,该企业所使用的钒钛磁铁矿品位较低,采选过程能耗较大,导致碳足迹较高。

3 钢铁企业降碳路径规划

根据评价结果,该企业降碳应重点关注烧结、炼铁工序,尽可能减少焦炭、洗精煤等的使用。在此基础上,结合自身降碳目标、区域资源禀赋及能源条件等,综合考虑相关降碳技术的降碳效果、成熟度、适用性、投资运行成本等因素,构建符合企业实际的降碳路径。本文从冶炼工艺变革、生产流程优化、系统能效提升、碳捕集利用、能源结构转换等方面规划企业降碳路径,具体如下。

3.1 冶炼工艺变革

以氢代碳是钢铁行业实现“双碳”目标的主要方向。氢基竖炉采用气基直接还原炼铁技术,从源头减少碳素使用,1 t 铁的碳排放量可降低 58.8%^[4]。结合该企业所在区域丰富的钒钛磁铁矿资源,在冶炼工艺方面可实施“氢基竖炉+熔分电炉+提钒转炉+转炉/电炉+薄带铸轧”工艺,相比于传统流程,直接减少烧结、焦化等工序,且不使用焦炭等高碳原燃料,预期降低 30%~75%的碳排放量,同时还可高效回收钒钛磁铁矿钒、钛等资源。

高炉富氢冶炼可利用钢铁企业丰富的焦炉煤气,或天然气等富氢气体,喷入高炉内替代部分固体碳素消耗,达到以氢代碳、降低碳排放量的目的。碳循环冶炼将煤气中的 CO₂ 分离脱除后回喷进高炉,大幅提高 CO 间接还原比例,降低 C 的直接还原比例,进而从源头上降低燃料的碳素消耗,减少碳排放^[5]。针对该企业现有高炉可进行富氢冶炼、碳循环冶炼改造,可大幅降低高炉燃料比,预期直接降低 10%~30%的碳排放量。

3.2 生产流程优化

立足于现有工艺及装备,通过调整和优化原料工艺结构等,挖掘节能降碳潜力,提升流程效能。结合企业实际,可通过高炉大球团比、高炉添加废钢、

提高转炉废钢比、转炉底吹 CO₂ 来优化生产流程,降低碳排放量。

(1) 高炉大球团比。目前,我国高炉炼铁炉料结构主要以烧结矿为主,但烧结工艺相较于球团工艺普遍存在工序能耗高、污染物排放量大等问题。研究表明,球团工序能耗约为烧结工序的 1/3~1/2;1 t 球团矿的烟气量约为烧结矿的 30%;球团工序碳排放量也仅为烧结工序的 20%~45%^[6]。因此,使用球团矿替代烧结矿,提高球团矿在高炉炼铁中的使用比例,有利于降低铁前系统的污染物排放量和碳排放量,减排优势明显。

(2) 高炉添加废钢。在高炉炉料中加入废钢具有很多优点,可以提高高炉生产率以及降低燃料比,通过调整废钢的粒度大小,还可以调节高炉炉内料床的气孔率,使高炉顺利运行^[7]。以 1 050 m³ 的高炉为例,添加废钢 150 t/d,可降低焦比 15 kg/t,每年可降低碳排放量为 5.87 万 t CO₂^[8]。

(3) 提高转炉废钢比。提高转炉废钢比也是有效的降碳路径之一。某转炉废钢比由原有的 15%提高至 21%,1 t 钢水的碳排放量可降低 7%^[9]。

(4) 转炉底吹 CO₂。CO₂ 与碳反应吸热可以起到控温、搅拌、覆盖保护和稀释的作用,不仅能降低碳排放量,还能降低生产成本,提高钢水质量^[10]。

3.3 系统能效提升

系统能效提升是通过节能技术深度应用与装备升级改造,实现能源精细化管理,余热余能应收尽收,做到全系统极致能效。从实际出发,该企业的生产工序和公辅设施可通过应用相关节能技术和智能化技术,合理优化运输组织,实现余热余能回收利用,提升物流效率。具体措施如下:①采选工序。可应用层压粉碎技术、高压辊磨机、智能矿山等。②烧结工序。可使用变频设施或采取燃料粒度控制措施。③焦化工序。可应用煤调湿技术、焦炉上升管余热回收与变频调速或前导流装置等。④炼铁工序。包括富氧率、高炉冲渣水余热回收、热风炉燃烧器性能优化等技术。⑤炼钢工序。该工序能够提高转炉煤气回收率,因此可以灵活应用转炉炉口微差压技术、节能烘烤技术。⑥轧钢工序。在加热炉配置汽化冷却装置,以回收蒸汽。⑦公辅设施。可通过应用变频调速装置、使用低导热系数保温材料、采取高效照明等措施,进一步提升能源利用效率。

3.4 碳捕集利用

碳捕集利用是实现钢铁行业碳中和的托底措施,可将 CO₂ 从排放源中分离出来并进行资源化利用。钢铁生产中的烧结烟气、高炉的热风炉烟气、石灰窑烟气、轧钢加热炉烟气、煤气燃烧发电烟气等是碳排放的主要来源。单纯的碳捕集成本较高,但如果

将碳捕集与化工生产等耦合,则可以为 CO₂ 的资源化利用创造条件,从而带来一定的经济效益。

根据企业生产实际,可充分利用竖炉解析气、高炉解析气、石灰窑烟气等中的 CO₂,结合当地丰富的天然气资源,将 CO₂ 与天然气重整制备甲醇、乙二醇等高附加值化工产品,实现钢铁生产中 CO₂ 跨行业高效循环利用。

3.5 能源结构转换

除了采用氢基竖炉、富氢冶炼等以氢代碳能源替代路径外,还应进一步转换能源结构,使用太阳能、风能等绿色能源替代化石燃料,持续提升采掘、冶炼、加热、物流等生产流程中绿色能源的使用比例。

4 结语

采用生命周期碳足迹评价方法,精确测算产品生产全过程的碳排放,详细解剖各工序、物料的碳排放贡献,准确挖掘降碳潜力,可为企业规划降碳路径提供有力支撑,对推动钢铁行业及上下游产业链的低碳发展具有重要意义。

参考文献

- [1] 杨建新.面向产品的环境管理工具:产品生命周期评价[J].环境科学,1999,20(1):100-103.
- [2] 邹安全,罗杏玲,全春光.钢铁行业供应链碳足迹界定及影响因素研究[J].科技进步与对策,2015,32(8):77-81.
- [3] 陈程,高思雯,李桢洸,等.生命周期评价助力钢铁行业低碳发展[J].冶金经济与管理,2021(3):4-5,8.
- [4] 王新东,赵志龙,李传民,等.基于富氢焦炉煤气重整的氢冶金工程技术[J].钢铁,2023,58(5):11-19.
- [5] 孟嘉乐,唐惠庆,郭占成.利用气化炉加热重整煤气的氧气高炉节能减排分析[J].冶金能源,2013,32(5):14-18.
- [6] 王新东.适应高比例球团冶炼的高炉系统设计与生产实践[J].钢铁,2022,57(12):23-31.
- [7] 周传典.高炉炼铁生产技术手册[M].北京:冶金工业出版社,2002:358.
- [8] 凌志宏,周凌云,匡洪锋.韶钢高炉加废钢生产实践[J].宝钢技术,2023(1):53-57.
- [9] 杨建平,姚柳洁,高攀,等.面向转炉高废钢比冶炼工艺的废钢比与碳排放理论计算[J].中国冶金,2023,33(6):133-140.
- [10] 于春强.转炉底吹二氧化碳技术的应用[J].河北冶金,2022(10):35-38,44.

基金项目:五矿集团科技专项经费资助项目“金属矿业与冶金建设行业碳排放测算评价方法技术、标准和规范”(2021ZXD01)。

作者简介:苏丹(1986—),女,汉族,重庆人,硕士研究生,高级工程师,主要从事低碳环保相关咨询工作。