

# 钢铁生产过程二氧化碳排放计算方法与实践

刘宏强, 付建勋<sup>1</sup>, 刘思雨

(省部共建高品质特殊钢冶金与制备国家重点实验室, 上海大学, 上海, 200072)

**摘要:** 钢铁生产过程二氧化碳排放量的精确计算是钢铁行业节能减排的基础。本文对钢铁生产流程二氧化碳排放的三种常用温室气体排放计算方法进行介绍, 并基于 A 钢厂 2014 年的生产数据进行计算和分析对比。《省级温室气体清单编制指南》、《钢铁碳排放指南》两计算方法都是基于投入产出的统计方法, 二者温室气体计算结果数值相近, 前者吨钢 CO<sub>2</sub> 排放结果为 2.10t, 后者吨钢 CO<sub>2</sub> 排放结果为 2.01t; 由于后一种方法在计算时考虑了固碳产品的抵扣, 所以结果比前种方法结果偏小; 基于 ISO 标准的钢铁产品生命周期计算方法, 针对钢铁具体生产流程确定研究系统边界, 收集生命周期编制数据清单, 计算结果吨钢产品的 CO<sub>2</sub> 排放量为 2.309t, 相比前两种方法计算结果数值较大, 原因是计算时包含了铁矿石、煤炭等在开采、洗选、运输阶段产生的二氧化碳。

**关键词:** 二氧化碳排放; 计算方法; 碳排放清单; 生命周期评价

## The calculation methods of carbon dioxide and it's practice in steel-making process

LIU Hong-qiang, FU Jian-xun, LIU Si-yu

(State Key Laboratory of Advanced Special Steels, Shanghai University, Shanghai, China, 200072)

**Abstract:** Quantitative calculation for carbon dioxide emissions in the steel-making process is the basis of energy-saving and emission-reduction work in the steel industry. This paper introduces three methods for carbon emissions calculation in the domestic steel-making process. The production data of Steel Plant A in 2014 were given and analyzed by three calculation methods to compare the differences. The methods of *Provincial Guidelines for Greenhouse Gas Inventories* (PGGGI) and *Accounting Methods and Reporting Guidelines for Greenhouse Gas Emissions in Chinese Steel Producers* (AMRGGE) are both calculated according to Input-Output model. Similar results were given by both methods, the calculation result of PGGGI is 2.10 t CO<sub>2</sub>/t steel and that of AMRGGE is 2.01 t CO<sub>2</sub>/t steel. The carbon dioxide emission result of AMRGGE methods is higher because some by-products contain carbon were removed. The whole life cycle of steel product were studied by the Life Cycle Assessment(LCA) method based on ISO standards, and the detailed carbon dioxide inventory were listed. The carbon dioxide emission of LCA is 2.309 t CO<sub>2</sub>/t steel which is higher than the other two methods, because a greater range system boundary which contained iron ore, coal mining and transportation were considered in this method.

**Key words:** CO<sub>2</sub> emission; calculation methods; CO<sub>2</sub> emission inventory; Life cycle assessment

### 1 前言

化石燃料燃烧产生的温室气体是导致全球变暖的元凶, 温室气体成为全球环境保护的首要议题。我国是《京都议定书》缔约国之一, 又是目前温室气体排放第一大国, 减少温室气

---

**基金项目:** 国家自然科学基金项目 (51474142), 12.5 科技支撑计划项目 (2013BAE07B00)

**第一作者:** 刘宏强 (1991—), 男, 硕士研究生, **E-mail:** liuhongqiang613@163.com

**通讯作者:** 付建勋 (1969—), 男, 上海大学教授, 博士生导师, **Email:** fujianxun@shu.edu.cn

体排放势在必行。“十二五”期间,我国节能减排工作正逐步进入“能源强度”和“碳强度”双指标约束时代,能耗强度大约下降了 16%,CO<sub>2</sub> 排放强度下降 17%,并正在建立完善的温室气体排放和节能减排的统计监测制度<sup>[1-3]</sup>。2014 年中美双方 12 月在北京发布应对气候变化的联合声明,明确提出 2030 年中国碳排放将达到峰值,我国将改变能源消费结构,加速经济转型,2030 年非化石能源在一次能源中的比重将提升到 20%<sup>[4]</sup>。我国政府向联合国气候变化框架公约秘书处提交了应对气候变化国家自主贡献文件中指出,我国的单位国内生产总值二氧化碳排放比 2005 年下降 60%-65%。国家“十二五”规划《纲要》提出“建立完善温室气体统计核算制度,逐步建立碳排放交易市场”,《“十二五”控制温室气体排放工作方案》提出的“加快构建国家、地方、企业三级温室气体排放核算工作体系,实行重点企业直接报送温室气体排放和能源消费数据制度”。建立温室气体排放科学核算标准和规范报告,制定企业温室气体排放控制计划,是各个行业发展共同的任务。

钢铁产业是典型的高能耗、高污染行业,势必成为节能减排的重中之重。每年全国总能耗中的 13%~15%来自于钢铁工业,其中 CO<sub>2</sub> 排放量约占全部排放量的 12%<sup>[5]</sup>。徐匡迪院士指出,目前我国的钢铁行业发展不均衡、落后产能较多、能源利用率低、碳排放强度高。以煤为主的能源结构使中国二氧化碳排放处于世界前列,我国承担着特殊而又艰巨的减排责任,中国需要转变发展方式,建设低碳社会<sup>[6]</sup>。2007 年 10 月国际钢铁协会和国际能源署发表声明,认为世界所有钢铁企业的碳排放中有 51%是中国钢铁企业排放的,要求中国钢铁行业提高能源效率、减少碳排放<sup>[7]</sup>。因此,中国钢铁工业发展方向必须是在发展高附加值产品同时,坚持走低碳排放、低石化依赖,高能源效率的路线。随着环境压力的日益增大,我国钢铁行业需要向“低石化依赖、温室气体低排放”的路线转变。

相对于国外成熟的碳足迹计算理论,目前我国钢铁行业的温室气体计算的研究仍处于基础阶段,尚未形成权威的温室气体排放核算标准,迫切需要开展深入的研究。本文介绍了钢铁生产流程的三种碳排放计算方法:《省级温室气体清单编制指南》、《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)》(以下简称:《钢铁指南》)以及基于 ISO 标准的钢铁产品生命周期计算方法,并基于 A 钢厂 2014 年的生产数据进行计算、分析比较。

## 2 钢铁工业试行的碳排放计算方法概述

碳排放的计算从方法论上分为基于生命周期(LCA)和基于投入产出(I-O)的两类统计方法<sup>[8-14]</sup>。“碳足迹”计算是目前国外普遍采用的定量评价碳排放强度的方法<sup>[15-18]</sup>。碳足迹是指在人类生产和消费活动中直接和间接排放的与气候变化相关的气体总量,常见的温室气体包含二氧化碳(CO<sub>2</sub>)、甲烷(CH<sub>4</sub>)、氧化亚氮(N<sub>2</sub>O)、氟氢碳化物(HFCS)、全氟碳化物(PFCS)、六氟化硫(SF<sub>6</sub>)等六类<sup>[19]</sup>,由于二氧化碳是排放量最大、最主要的温室气体,故常用二氧化碳的排放代表整个温室气体的排放水平。碳足迹相关国际标准包含英国 PAS 2050、日本 TSQ0010、GHG Protocol 等。国际标准化组织于 2011 年国际标准化组织的 ISO 标准全面兼容 PAS2050 的标准,成为国际通用标准<sup>[20-21]</sup>。适用于产品生命周期的 ISO 14040、ISO 14044、ISO 14064、ISO 14067 等构成了温室气体的评价标准,统称 ISO 14000 系列,该计算方法采用基于生命周期分析的方法进行分析。尽管上述碳足迹计算标准已成立多年,并被国外多数钢铁公司应用在钢铁企业的碳足迹研究上,然而上述标准由于操作过程多数据要求苛刻,计算过程复杂,该方法并没有被我国钢铁企业采用。

近十余年来基于全球节能减碳的背景,国内相关主管部门陆续出台了《省级温室气体清单编制指南》、《钢铁指南》两部温室气体排放计算的指导方法,用于预测未来减排潜力,指导温室气体排放计算。这两种方法均基于“投入产出”的方法,通过划定研究的系统边界,确定碳排放源种类、编制温室气体排放清单、建立温室气体的计算公式,进而指导钢铁企业确定在生产过程中温室气体排放量。上海大学付建勋教授遵循生命周期分析方法以及

ISO14000 系列碳足迹盘查标准，借鉴台湾中钢公司碳减排的管理方法，提出了一种适宜国内钢铁生产流程碳排放分析的计算方法（简称：基于生命周期的方法），并开发了专门的数据库管理系统，借助软件系统对钢铁生产的碳排放进行计算与分析。

为了更好地对比分析上述三种碳排放计算方法，本文基于 A 钢厂 2014 年度实际生产数据，利用三种计算方法分别计算 A 钢厂的温室气体排放量并进行分析比较。A 钢厂是典型的长流程钢铁生产企业，采用“高炉-转炉-连铸-热轧”生产模式，精炼过程中主要采用 LF 精炼，铁水自给率 100%。拥有自己的铁矿石开采厂和煤炭厂，该厂主要包括焦化、烧结、高炉、炼钢、轧制五大工序，没有球团工序，球团矿采用外购的方式。

表 1 是 A 钢铁企业 2014 年企业外购能源使用情况，将能源使用量(t)转化成热值(TJ)；其中钢铁企业常见的化石单位燃料含碳量与碳氧化率参数结合 A 钢厂的实际情况并与指南给出的参考值的做参照。

表 1 A 钢厂 2014 年企业主要化石能源使用情况报表

Table 1 The major energy usage in the year of 2014 in A steel plant

能源种类	洗精煤	无烟煤	动力煤	冶金焦	汽油	柴油
单位 (×10 <sup>4</sup> t)	194.62	76.51	31.963	57.27	0.058	0.65
单位 (×10 <sup>3</sup> TJ)	50.53	19.22	6.21	15.44	0.027	0.32

A 钢厂 2014 年消耗白云石为 45 万吨；消耗石灰石 110 万吨，直接用于熔剂石灰石 35 万吨，剩余用于生产生石灰 42 万吨。生铁产量为 470 万吨，粗钢产量 501 万吨，钢铁生产过程中的排放因子按照表 2 计算；用于生产用外购电力为 11.82×10<sup>8</sup>kWh，电力的二氧化碳排放系数参考候萍<sup>[22]</sup>等研究结果，取 0.826kgCO<sub>2</sub>/kWh。表 2 是 A 钢厂钢铁生产过程石灰石、白云石排放因子、以及生铁平均含碳量、钢材平均含碳量。

为了简化模型，方便计算，钢水浇铸只考虑连铸。在本文案例分析中，轧制方式全部采用热轧，本研究中钢铁生产数据清单仅计入了对产生碳排放影响较大的数据，而对于原物料消耗量少对碳排放影响小的数据，做忽略处理。

表 2 钢铁生产过程排放因子

Table 2 Emission factors in steel production process

类别	单位	数值	类别	单位	数值
石灰石消耗	吨二氧化碳/吨石灰石	0.430	生铁平均含碳量	%	4.1
白云石消耗	吨二氧化碳/吨白云石	0.474	钢材平均含碳量	%	0.248

### 3 省级温室气体清单编制指南方法

《省级温室气体清单编制指南》是由包括国家发展改革委气候司、国家发展改革委能源研究所等多家单位的专家编写，该指南针对涵盖工业、农业、林业、废弃物处理等多个方向的碳排放制订了计算方法和排放报告。其中钢铁行业的温室气体排放分为化石燃料燃烧、工业生产过程、电力等间接排放三类分别计算，并给出了具体的计算公式，表 3 是对该方法主要的计算公式。

下面基于 A 钢厂 2014 年的生产数据进行案例分析。案例以 A 厂物料购入边界作为系统边界，因二次燃料煤气是由焦化、喷煤等一次燃料转化形成，属于系统内循环，不重复考虑，计算中只考虑外购的原燃料所产生的温室气体排放，用于统计了 A 钢铁企业全年因化石燃料燃烧量、工业生产过程、电力消耗所产生的温室气体排放量。

公式（2）、（4）、（5）分别计算化石燃料燃烧、工业生产、电力消耗所产生的温室气体排放量。表 4 是 A 钢厂 2014 年企业温室气体总排放量计算结果。

表 3 钢铁企业温室气体排放计算方法

Table 3 Greenhouse gas emission calculation methods in steel-making processes

类别	计算公式	备注
CO <sub>2</sub> 总量	(1) $E_{CO_2} = E_{com} + E_{pro} + E_{ele}$	$E_{CO_2}$ 为单位产品 CO <sub>2</sub> 排放量 (tCO <sub>2</sub> ) ; $E_{com}$ 为单位产品化石燃料产生 CO <sub>2</sub> (tCO <sub>2</sub> ) ; $E_{pro}$ 为单位产品生产过程产生 CO <sub>2</sub> (tCO <sub>2</sub> ) ; $E_{ele}$ 为单位产品净购入电力产生 CO <sub>2</sub> (tCO <sub>2</sub> ) ;
化石燃料 $E_{com}$	(2) $E_{com} = \frac{44}{12} \sum_{i=1} [(AD_i \times \eta_{ic} - D_i) \times \phi_i]$	$AD_i$ 是单位产品第 i 化石燃料表观消费量 (TJ) ; $\eta_{ic}$ 是第 i 种燃料单位热值含碳量 (吨碳/TJ) ; $D_i$ 是第 i 种燃料用于非能源用途的固碳量 ; $\phi_i$ 是单位产品第 i 燃料的燃烧平均氧化率。
生产过程 $E_{pro}$	(3) $E_{pro} = AD_l \times EF_l + AD_d \times EF_d + (AD_r \times F_r - AD_s \times F_s) \times \frac{44}{12}$	$AD_l$ 是钢铁企业消费作为溶剂的石灰石数量 ; $EF_l$ 是作为溶剂的石灰石消耗排放因子 ; $AD_d$ 是钢铁企业消费的作为溶剂的白云石数量 ; $EF_d$ 是作为溶剂白云石的排放因子 ; $AD_r$ 是炼钢用生铁量 ; $F_r$ 是生铁平均含碳率 ; $AD_s$ 是炼钢的钢材产量 ; $F_s$ 是钢材平均含碳率。
外购电 $E_{ele}$	(4) $E_{ele} = AD_{ele} \times EF_{ele}$	$AD_{ele}$ 生产过程中外购电力消耗量 (kWh) ; $EF_{ele}$ 是电力温室气体排放因子 (kgCO <sub>2</sub> /kWh) ;

表 4 A 钢厂 2014 年企业温室气体排放排放量

单位 (万吨 CO<sub>2</sub>)

Table 4 Greenhouse gas emission in the year of 2014 in A steel plant Unit ( 10<sup>4</sup> ton CO<sub>2</sub>)

化石燃料燃烧	工业生产过程	电力消耗	总量	吨钢排放 (tCO <sub>2</sub> /t 钢)
830	133	96.9	1149.9	2.10

计算可知, 2014 年度 A 的温室气体排放总量为 1149.9 万吨, 吨钢 CO<sub>2</sub> 排放为 2.100t, 化石燃料燃烧、工业生产过程、外购电力消耗三部分产生的温室气体分别为 830 万吨, 133 万吨以及 96.9 万吨。

#### 4 基于《钢铁指南》的计算

《钢铁指南》是国家发展改革委委托国家应对气候变化战略研究和国际合作中心专家编制, 借鉴了国内外有关企业温室气体核算报告研究成果和实践经验。《钢铁指南》明确了本指南的适用范围、核算边界、核算方法、质量保证和文件存档要求以及报告内容和格式规范。基于投入产出思想, 在钢铁企业宏观层面上核算钢铁生产过程的温室气体排放, 不考虑系统内部的物质流循环; 核算的温室气体种类为二氧化碳, 排放源包括燃料燃烧排放、工业生产过程排放、电力、热力调入调出产生的排放和固碳产品隐含的二氧化碳排放。该指南是《省级温室气体清单编制指南》在钢铁行业温室气体排放计算的具体化。

图 1 是钢铁生产系统边界示意图, 包括直接生产系统、辅助生产系统以及为生产服务的附属系统, 其中辅助生产系统包括动力、供电供水、化验机修、库房运输等; 附属生产系统包括指挥系统和区内为生产服务的单位如职工食堂、车间浴室、保健站等。

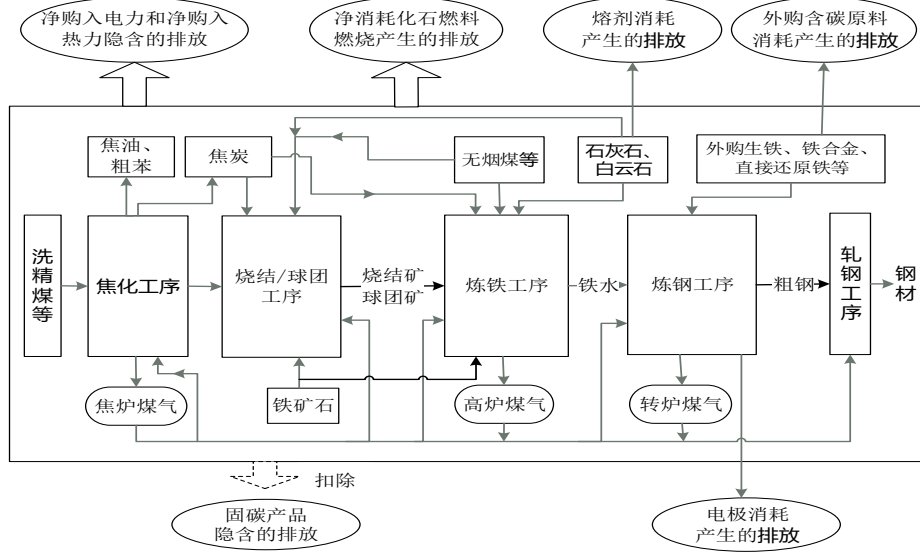


图1 钢铁生产企业温室气体排放及核算边界

Fig.1 Greenhouse Gas Emissions and Accounting Boundaries in Steel Producers

《钢铁碳排放指南》将钢铁生产分为四个燃料燃烧排放：工业生产过程排放，净购入使用的电力、热力产生的排放，固碳产品隐含的排放。钢铁生产企业的  $\text{CO}_2$  排放总量按照公式（6）计算：

$$E_{\text{CO}_2} = E_{\text{com}} + E_{\text{pro}} + E_{\text{ind}} - R_h \quad (6)$$

式中：  $E_{\text{CO}_2}$  为企业  $\text{CO}_2$  排放总量（ $\text{tCO}_2$ ）；

$E_{\text{com}}$  为企业所有净消耗化石燃料燃烧产生  $\text{CO}_2$ （ $\text{tCO}_2$ ）；

$E_{\text{pro}}$  为企业工业生产过程产生  $\text{CO}_2$ （ $\text{tCO}_2$ ）；

$E_{\text{ind}}$  为企业净购入电力和净购入热力产生的  $\text{CO}_2$ （ $\text{tCO}_2$ ）；

$R_h$  为企业固碳产品隐含的  $\text{CO}_2$ （ $\text{tCO}_2$ ）。

因燃料燃烧产生的温室气体排放和《省级温室气体清单编制指南》计算方法上一致，但仅统计净使用量，不去除非能源用途固碳量；工业生产过程中产生的温室气体排放是由包括熔剂白云石、石灰石、电弧炉、精炼炉用电极、炼钢原料外购生铁、废钢所带来的，工业生产过程的温室气体排放计算按照公式（7）。

$$E_{\text{ind}} = P_e \times EF_e + \sum_{i=1}^n P_i \times EF_i + \sum_{i=1}^n M_i \times EF_i \quad (7)$$

式中：

$P_e$ 、 $P_i$ 、 $M_i$  分别是钢铁生产过程中电极，石灰石、白云石，外购铁水、铁合金等用量（t）；

$EF_e$ 、 $EF_i$  是对应的相关物质消耗的碳排放系数（ $\text{tCO}_2/\text{t}$ ）；

固碳产品所含的温室气体排放按照公式（8）计算：

$$R_h = \sum_{i=1}^n AD_i \times EF_i \quad (8)$$

式中：

$AD_i$  是第  $i$  种固碳产品的产量，单位（t）

$EF_i$  是第  $i$  种固碳产品的碳排放系数，单位（ $\text{tCO}_2/\text{t}$ ）

A 厂固碳产品隐含的碳排放可以分为三类：一类是外售的冶金煤气（高炉煤气、转炉煤气、焦炉煤气），另一类是含碳副产品煤焦油、粗苯以及其他焦化副产品，第三类是产品粗钢。表 5 是 A 钢厂 2014 年含碳电极以及固碳产品的产量。

表 5 A 钢厂 2014 年含碳电极消耗量以及固碳产品的产量

类别	用量	单位
电极	2000	t
粗钢	5000000	t
高炉煤气（外调）	178500	$\times 10^3 \text{m}^3$
转炉煤气（外调）	37090	$\times 10^3 \text{m}^3$
焦炉煤气（外调）	125219	$\times 10^3 \text{m}^3$
焦油	60900	t
粗苯	13477	t
蒸气	25189	GJ

表 6 A 钢厂 2014 年温室气体排放情况 单位（万 tCO<sub>2</sub>）

**Table6 Greenhouse gas emissions in the year of 2014 in A steel plant Unit ( 10<sup>4</sup> ton CO<sub>2</sub>)**

化石燃料燃烧	生产过程	电、热	固碳产品	总计	吨钢排放（吨 CO <sub>2</sub> /吨）
891.7	73.3	96.9	53.3	1008.6	2.01

按照《钢铁碳排放指南》计算方法，分别计算化石燃料燃烧、生产过程、电热消耗所产生的温室气体排放量以及固碳产品的隐含温室气体排放量，结果表明，2014 年 A 钢铁企业的温室气体排放总量为 1008.6 万吨，吨钢二氧化碳排放量为 2.01t，计算结果与省级温室气体清单编制指南方法计算结果相近。各类别计算详细结果见表 6。

## 5 基于生命周期的计算方法

生命周期评价一般包括以下四个方面：目的和范围的确定；生命周期清单的数据收集和计算，包括材料、能源和排放清单数据的收集和计算；生命周期影响评价；生命周期解释、评估<sup>[23]</sup>。钢铁产品生命周期的系统边界涵盖铁矿石、煤炭的开采、洗选，物料运输、产品生产过程三大部分。传统意义上，主要原料铁矿石并不是碳排放源，然而由于铁矿石开采需要消耗煤炭、石油等，同样会产生温室气体排放；在实际生产过程中，氧气、氮气、铁合金、废钢等在获取过程中，同样产生温室气体排放，这些额外附带的温室气体排放，应当计入钢铁产品的全生命周期的温室气体排放量总量上，本文提出基于 ISO 标准的钢铁产品生命周期碳排放计算，将温室气体排放源进一步扩大，范围由传统的能源项扩充到钢铁生产过程的所有物料项。基于生命周期方法的计算步骤如下：

### (1)绘制生产工艺、生产流程边界

基于生命周期思想研究钢铁产品的碳足迹，需要建立钢铁产品的生命周期系统边界，图 3 是本次案例研究的 A 钢厂生产的系统边界。在本案例的碳足迹研究中，以生产一吨普通碳素钢为功能单位，研究范围涵盖原燃料铁矿石煤炭的开采、洗选、运输，焦化，烧结，高炉，炼钢，轧制等工序。在研究中，将钢铁产品的生命周期分为原燃料开采、物料运输、产品生产三个部分进行研究。

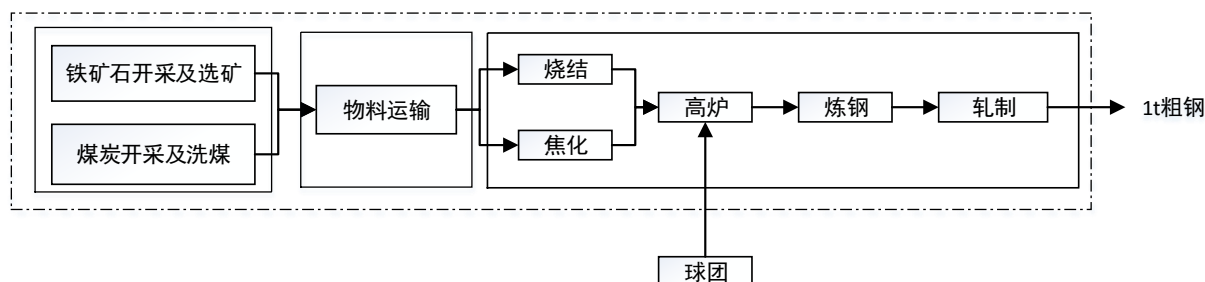


图 2 A 钢厂钢铁产品碳足迹生命周期分析系统边界

Fig.2 The LCA system boundaries of steel plant A's product

### (2)确定盘查优先顺序

确定 A 厂系统边界后，需一一盘查边界范围内排放源，以确保计算的可行性及避免耗费搜集无实质贡献之排放源数据。该厂的钢铁生产过程为传统高炉工艺流程，历经焦化、烧结、球团、炼铁、炼钢、轧钢等多个工序，通过能源、熔剂及其它各种形式进入钢铁生产体系的碳素在各个工序中经过一系列变化，一部分进入产品或各种副产品，另一部分以废气排出。为此采用以大的生产流程为过程评估单位，依据焦化、烧结、球团、炼铁、炼钢、轧钢等大工序分段计算。

### (3) 数据收集

钢铁碳足迹计算主要包括 3 个范围:①直接排放量，主要包括各种原物化石燃料、熔剂、原料及副产品;②消费外购电力、热和蒸汽所带来的间接的上游排放;③各种燃料、原料、熔剂及动力介质的上游生产带来的排放。

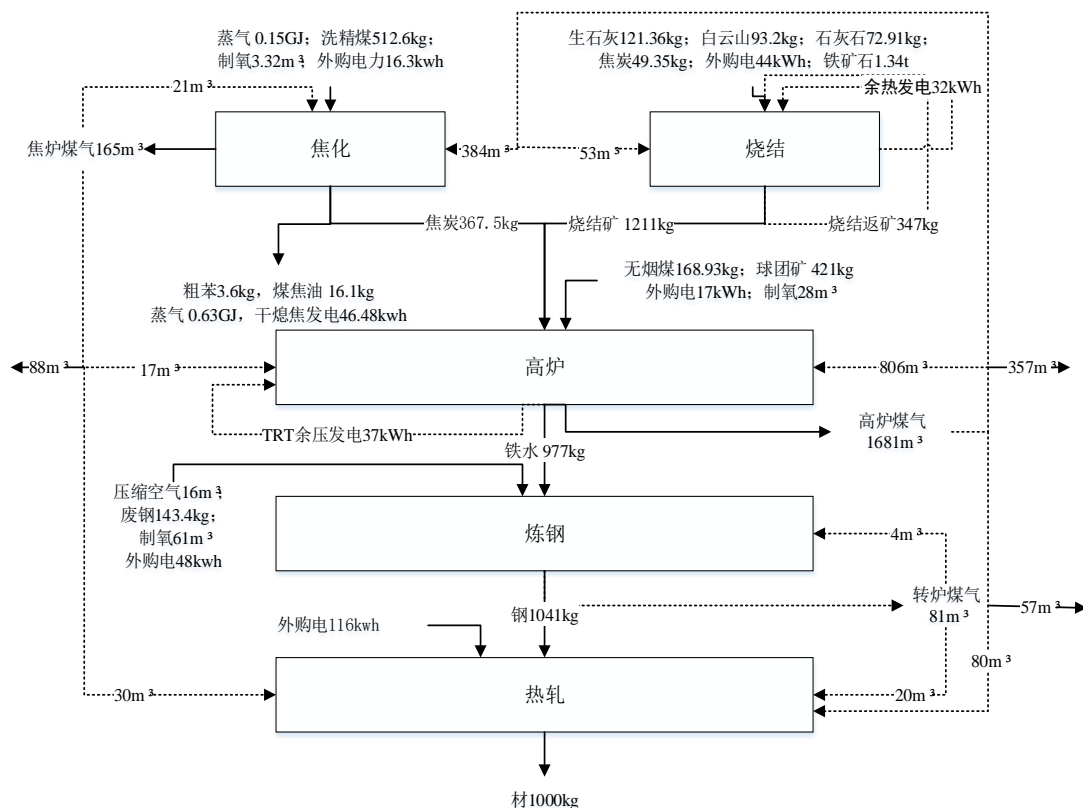


图 3 A 钢厂 1t 普通碳钢生产工序生命周期清单

Fig.3 The Life cycle inventory of 1ton carbon steel made in steel plant A

图 3 是 A 钢厂中生产过程中，产生 1t 粗钢各工序主要原物料的清单分析，图中考虑了各工序的余热余压资源回收利用情况，A 钢厂电力部分自供，主要是余热余压以及煤气发电，同时焦化工序采用干熄焦工艺，余热蒸汽回收 1.71GJ/t 焦炭，烧结烟气余热发电，发电量 20.53kWh/t 烧结矿，高炉 TRT 余压发电，发电量 37.87 kWh/t 铁水。在图 4 中，电力分为自给用电和外购用电两部分。主要的二次能源冶金煤气（焦炉煤气；高炉煤；转炉煤气）在各大生产工序中也有具体指出用量，A 钢厂的煤气资源除了用作自身的工序的加热燃料，富余部分外供市区，以及附属生产公司。虚线表示工序产品在系统边界内产生循环利用；既是产品又是原料。

盘查时各个数据项按照图 3 的流程进行数据处理。统计时对各生产工序所涉及的每种原物料及能源建立编码。同时考虑各个承接工序间因损耗而产生的界面系数，并按照系统边界确定总的产出物，折算出钢铁厂平均每吨钢排放 CO<sub>2</sub> 的量,或工厂每年总的 CO<sub>2</sub> 排放量。前一个生产工序生产的产品变为下一个工序的原料时，必须考虑各个工序之间的损耗，这时必须乘以工序的界面系数。每一个大的生产流程依次按照碳排放的大小顺序进行统计，单一排放源之排放量若低于排放总量的 1%时，可以排除，但排除总量不能超过该产品生产周期温室气体排放总量的 5%，否则必须回溯。

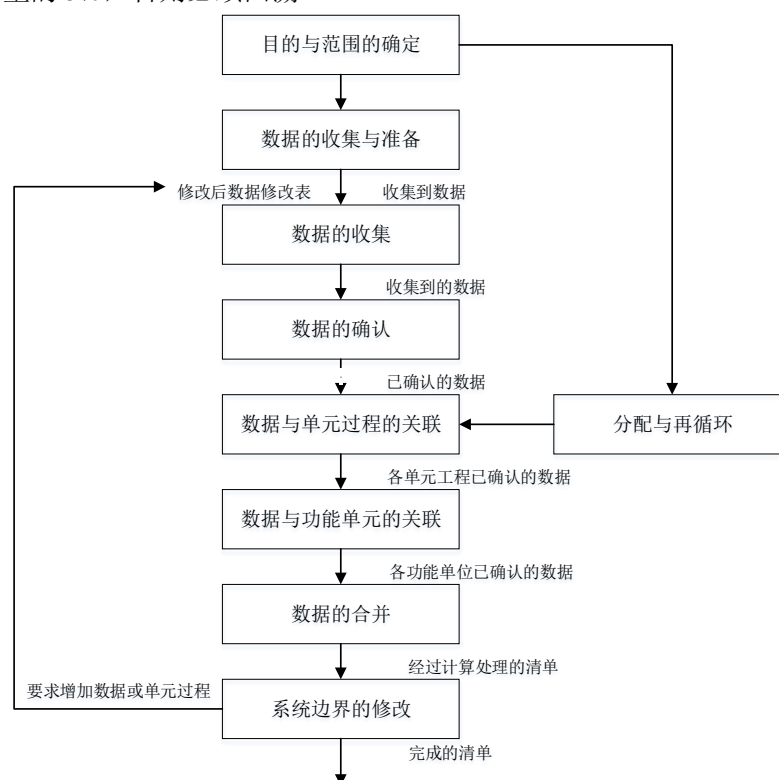


图 4 碳足迹普查的数据处理工作流程

Fig.4 Work Process for Dealing Data in Carbon Footprint Inventory

#### (4)结合碳当量系数汇总工序碳当量

对于钢铁生产过程的物质、能源项，需要结合每种物料及能量的碳当量系数，汇总主要工序及辅助环节的碳当量。对于计算过程中的碳排放系数选取，目前国内钢铁行业的数据尚未建立完整的碳排放数据库，为保证计算准确，碳排放系数数据优先选用国家权威部门发布的 CO<sub>2</sub> 排放因子数据，如国家发改委、《中国工程院》等发布的数据，部分来源于《IPCC2006 国家温室气体清单指南》(IPCC, 2006)，部分数据引用自 SimaPro 数据库。本研究中，碳排放的数据选取综合了国内相关钢铁生产情况以及国外 GaBi 商业数据库，并结合了 A 钢厂原燃料成分实际情况。



### ⑤数据汇总

现场收集的相关生产数据在完成单位转换后, 根据数据处理流程, 对 SQL 数据库的数据项进行叠加汇总, 自动计算出汇总后的 CO<sub>2</sub> 排放数值。计算时考虑各个承接工序间因损耗而产生的界面系数, 并按照系统界定的边界确定钢厂总的产出物, 即可折算出钢铁厂平均每吨钢排放 CO<sub>2</sub> 的数量或钢铁厂总的 CO<sub>2</sub> 排放量。

表 7 生产 1 吨粗钢各工序温室排放总量

单位 (kg)

	Tab.7 The whole greenhouse gas emissions when 1ton crude steel be made									Unit (kg)
	开采 选矿	煤炭 采洗	原料 运输	焦 化	烧 结	球 团	高 炉	炼 钢	轧 制	合 计
CO <sub>2</sub>	93.4	73.5	11.3	394.3	513.4	33.8	822.5	122.6	243.7	2308.7
CH <sub>4</sub>	0.04	0.02	3.17E-4	0.01	0.05	0.001	0.03	0.002	0.04	0.22
N <sub>2</sub> O	9.0E-6	7.8E-6	3.81E-5	8E-3	2E-3	1E-4	2E-3	4E-5	1.7E-6	0.012
CO <sub>2eq</sub>	93.5	73.5	11.3	394.4	513.5	33.8	822.5	122.6	243.7	2308.9
%	4.05	3.18	0.49	17.08	22.24	1.46	35.62	5.31	10.56	100

注: A 钢厂无球团工序, 球团外购, 按生命周期方法应计算在内, 相关数据取自参考文献<sup>[24]</sup>。

基于图 (1) 包含铁矿石、煤炭开采等工序在内完整系统边界, 计算了该钢厂钢铁生产过程中生命周期内各工序的温室气体排放量, 详见表 7。结果显示, 采用 ISO 标准对 A 钢厂的生产 1t 普通碳素钢生命周期碳足迹研究表明, 将产生 CO<sub>2</sub> 总计 2308.7kg, CH<sub>4</sub> 总计 0.22kg, N<sub>2</sub>O 总计 0.012kg。钢铁产品的温室气体排放主要是 CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>、N<sub>2</sub>O 排放总量很小, 可以忽略不计。

全球变暖潜能值 (Global Warming Potential, GWP) 是基于充分混合的温室气体辐射特性的一个指数, 用于衡量相对于二氧化碳的, 在所选定时间内进行积分的, 当前大气中某个给定的充分混合的温室气体单位质量的辐射强度。GWP 是在 100 年的时间框架内, 各种温室气体的温室效应对应于相同效应的二氧化碳的质量。根据 IPCC 规定, CO<sub>2</sub>、CH<sub>4</sub>、N<sub>2</sub>O 的 GWP 值分别为 1, 21, 310。综合表 7 计算结果, 将所有温室气体转换为二氧化碳当量 CO<sub>2eq</sub>, 得出生产 1 吨粗钢产生的温室气体的 CO<sub>2eq</sub> 值为 2308.9

## 6. 三种计算方法分析对比

对 A 钢厂温室气体排放计算结果上来说, 基于《省级温室气体编制指南》方法、《钢铁碳排放指南》方法以及基于 ISO 标准的生命周期碳足迹研究方法的吨钢温室气体排放研究结果分别为 2.10tCO<sub>2</sub>, 2.01t CO<sub>2</sub>, 2.31t CO<sub>2eq</sub>。

《省级温室气体清单编制指南》、《钢铁碳排放指南》二者的温室气体计算结果数值相近, 前者吨钢 CO<sub>2</sub> 排放结果为 2.100t, 后者吨钢 CO<sub>2</sub> 排放结果为 2.010t; 《省级温室气体编制指南》统计范围包括: 化石燃料燃烧、电力间接排放以及生产过程减排排放三部分; 而《钢铁指南》计算包括化石燃料燃烧、外购电、热间接排放、生产过程、固碳产品抵扣项四部分, 因在计算时考虑了固碳产品的抵扣, 所以结果比前种方法结果偏小。《省级温室气体清单编制指南》、《钢铁指南》主要是对钢铁企业内部生产的能源以及部分物料消耗进行统计计算, 对于原材料铁矿石、煤炭的开采等工序产生的温室气体并不计算在内。基于 ISO 标准的钢铁产品生命周期计算方法针对钢铁生产的全生命周期编制数据清单, 边界定义更为完整, 数据的统计项更加丰富, 吨钢产品的 CO<sub>2</sub> 排放量为 2.309t, 相比前两种方法计算结果数值较大, 原因是计算时包含了铁矿石、煤炭等在开采、洗选、运输阶段产生的二氧化碳。

在计算方法上, 《钢铁指南》与《省级温室气体编制指南》均是基于企业层面, 将企业作为一个“黑箱”, 基于投入产出计算方法, 统计钢铁企业的能源与物料消耗, 进行温室气体排放量的计算, 对于企业内部的物质流循环不做深入研究; 生命周期计算方法是基于产品

层面，将产品生产过程作为“白箱”，通过对具体的钢铁产品进行生命周期的分析，通过建立完整的研究系统边界，收集碳排放数据清单，结合碳排放系数，进行温室气体排放计算。

在实际计算过程中，三种计算方法计算温室气体排放量时，都需要结合相应的碳排放系数，三种计算方法在碳排放系数的选取上，不尽相同。对于《钢铁指南》与《省级温室气体编制指南》，碳排放系数主要为直接碳排放系数与间接碳排放系数，具体表现为化石燃料煤炭、焦炭、天然气等直接碳排放系数以及外购电力、熔剂石灰石、白云山使用等产生的间接碳排放系数；然而在钢铁产品的生命周期计算中；除了直接与间接碳排放系数，还引入了废钢、铁合金等上游碳排放系数。在生命周期分析方法中，理论上所有生命周期清单数据均是碳排放源，而我国目前主要碳排放系数研究仍是直接碳排放系数，对于上游间接碳排放系数数据库的数据仍然较少，只能借鉴与国际钢协或 Gabi 软件等相关生命周期分析软件提供的数据库，难以获得符合我国钢铁生产较契合的数据，这也是我国开展产品生命周期碳足迹精确计算分析的难点之一。

《省级清单编制指南》与《钢铁指南》两种计算方法，数据体现钢铁企业整体的温室气体排放量情况，适用于部分以及行业温室气体排放的统计报告，对于钢铁生产过程中，物质流的转换、能源的利用效率，相关经济指标不做深入探讨研究。生命周期计算方法，通过对钢铁产品进行详细的数据清单分析，计算钢铁产品的碳足迹，计算结果包含钢铁生产过程的各工序的碳足迹，能够较为直观的反映各生产过程的物料循环、能源利用效率等，有利于钢铁企业有针对性的制定低碳产品生产路线，但由于生命周期计算方法统计范围全面，但对数据的要求更为苛刻，对数据在生产流程中的收集、管理要求更加严格，因此使用时必须有完整的数据链进行支撑。

## 7. 小结

(1)《省级温室气体清单编制指南》统计范围包括：化石燃料燃烧、电力间接排放以及生产过程减排排放三部分；《钢铁碳排放指南》计算包括化石燃料燃烧、外购电、热间接排放、生产过程、固碳产品抵扣项四部分，由于考虑了固碳产品的抵扣，所以结果比前种方法结果偏小；

(2)基于 ISO 标准的钢铁产品生命周期计算方法针对钢铁出厂前的数据清单进行编制，边界定义更为完整，数据统计项更加丰富，计算结果数值偏大，主要原因是计算时包含了铁矿石、煤炭等在开采、洗选、运输阶段产生的二氧化碳；

(3)在计算方法上《钢铁指南》与《省级温室气体编制指南》均基于企业层面，将企业作为一个“黑箱”考虑，基于“投入产出”方法进行计算；生命周期计算方法是基于产品层面，将产品生产过程作为“白箱”考虑，对具体的钢铁产品出厂前的阶段进行生命周期分析，系统边界更加完整。

### 参考文献：

- [1] 刘小敏. 国家“十二五”规划中能源强度与碳排放强度约束指标的比较研究[J]. 金融评论,2012,05:58-69+124.
- [2] 林高平.钢铁企业的低碳与绿色增长[N].宝钢日报,2011-4-19.  
<http://www.baosteel.com/baosteelpc/supplement/ShowArticle.asp?ArticleID=56894>
- [3] 解振华.解振华：“十二五”期间单位 GDP 能耗要降低 16%，中国新闻网，2011-11-22，  
<http://www.baosteel.com/baosteelpc/supplement/ShowArticle.asp?ArticleID=56894>
- [4] 蓝澜. 中美发布应对气候变化联合声明 携手降低温室气体排放，中国日报，2014-11-12.  
<http://world.people.com.cn/n/2014/1112/c1002-26010825.html>
- [5] 潘佳佳，李康水. 中国工业二氧化碳排放的影响因素分析[J]. 环境科学与技术，2011，04：86-92.
- [6] 徐匡迪. 转变发展方式 建设低碳经济[J]. 上海大学学报（社会科学版），2010，04：5-16.

- [7] 常阿平. 碳关税壁垒对我国钢铁行业的影响及应对之策[J]. 对外经贸实务, 2012, 10: 42-45.
- [8] 王微,林剑艺,等. 碳足迹分析方法研究综述[J]. 环境科学与技术,2010,07:71-78.
- [9] IPCC.2006. Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories [M].Japan: Institute for Global Environmental Strategies (IGES)
- [10] 张玥,王让会,刘飞. 钢铁生产过程碳足迹研究——以南京钢铁联合有限公司为例[J]. 环境科学学报,2013,334:1195-1201.
- [11] 董会娟,耿涌. 基于投入产出分析的北京市居民消费碳足迹研究[J]. 资源科学,2012,03:494-501.
- [12] 姚亮,刘晶茹,王如松,尹科. 基于多区域投入产出(MRIO)的中国区域居民消费碳足迹分析[J]. 环境科学学报,2013,07:2050-2058.
- [13] 孙建卫,陈志刚,赵荣钦,黄贤金,赖力. 基于投入产出分析的中国碳排放足迹研究[J]. 中国人口.资源与环境,2010,05:28-34.
- [14] 刘韵,师华定,曾贤刚. 基于全生命周期评价的电力企业碳足迹评估——以山西省吕梁市某燃煤电厂为例[J]. 资源科学,2011,04:653-658.
- [15] CARBON FOOTPRINT. What is a carbon footprint? [EB/OL]. (2008-05-10) [2012-10-01].  
<http://www.carbonfootprint.com/carbonfootprint.html>
- [16] Rees W E. Ecological footprint, and appropriate carrying capacity: what urban economic leave out [J] environment and Urbanization, 1992 (2):121-130.
- [17] Wackernagel M. Rees W E. Our ecological footprint-reducing human impact on the earth [M].Gabriola Island, B.C, Canada: New Society Publishers, 1996.
- [18] BSI, CARBON TRUST DEFRA, et al. PAS 2050: specification for the assessment of the life cycle greenhouse gas emissions of goods and services [EB/OL] . (2008-10-29) [2012-10-01]. <http://shop.bsigroup.com/en/Browse-by-Sector/>
- [19] Schumacher, K., Sands, R.D. Where are the industrial technologies in energy-economy models? An innovative CGE approach for steel production in Germany. Energy Economics (2007), 29, 799-825.
- [20] POST. Carbon Footprint of Electricity Generation[R]. Par-limentary Office of Science and Technology, 2006: POSTnote268.
- [21] Wiedmann T, Minx J.A definition of carbon footprint [J]. ISA Research & Consulting, 2007 (1): 1-9.
- [22] INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION ( ISO).ISO 14040: Environmental management-life cycle assessment-principles and framework [EB/OL]. ( 2006—07—01) [2011—1—20].
- [23] 侯萍,王洪涛,张浩,范辞冬,黄娜. 用于组织和产品碳足迹的中国电力温室气体排放因子[J]. 中国环境科学,2012,06:961-967.
- [24] 曾才兵,刘茂伟,李敬如. 邯钢Ⅱ期球团降低工序能耗的实践[J]. 烧结球团,2012,02:53-57.