

“中国式”电炉炼钢流程碳排放特点及其源解析

那洪明^{1,2}, 高成康^{1,2}, 郭玉华³, 田凡^{1,2}
(1. 东北大学冶金学院, 辽宁 沈阳 110819; 2. 东北大学国家环境保护生态工业重点实验室, 辽宁 沈阳 110819;
3. 钢铁研究总院先进钢铁流程及材料国家重点实验室, 北京 100081)

摘 要: 电炉炼钢流程,因其注入过多铁水在中国并未发挥减碳作用,本文称其为“中国式”电炉炼钢流程. 对此,本文在建立研究边界的基础上,结合排放因子法,构建了“中国式”电炉炼钢流程的碳排放桑基图,探寻碳排放的路径. 结果显示:采用“中国式”电炉炼钢,吨钢 CO₂ 排放量为 3.070 t. 其中,电炉炼钢工序 CO₂ 排放量最大,为 1.400 t. 特别地,代替废钢加入铁水导致 CO₂ 排放 1.419 t. 分析发现:中国钢铁企业处于成长期,废钢指数小,废钢资源不足;废钢回收利用系统不完善;工业用电价格高. 这些因素造成电炉炼钢流程采用了过多的铁水进行冶炼.

关 键 词: “中国式”电炉炼钢流程;CO₂ 排放;铁水;排放因子法;废钢指数

中图分类号: X 511 **文献标志码:** A **文章编号:** 1005-3026(2019)02-0212-06

CO₂ Emissions Characteristics and Source Analysis of “Chinese Style” Electric Arc Furnace Steelmaking Route

NA Hong-ming^{1,2}, GAO Cheng-kang^{1,2}, GUO Yu-hua³, TIAN Fan^{1,2}
(1. School of Metallurgy, Northeastern University, Shenyang 110819, China; 2. SEP Key Laboratory of Eco-industry, Northeastern University, Shenyang 110819, China; 3. State Key Laboratory of Advanced Steel Processes and Products, Central Iron & Steel Research Institute, Beijing 100081, China. Corresponding author: GAO Cheng-kang, E-mail: gaock@smm.neu.edu.cn)

Abstract: Electric arc furnace steelmaking route does not play the role of carbon reduction in China due to the excessive use of hot metal. This unique route is called the “Chinese style” electric arc furnace steelmaking route. Employing the emission factor method, the Sankey diagram of CO₂ emissions of “Chinese style” electric arc furnace steelmaking route is built to explore the path of carbon emissions. The results show that the CO₂ emissions per ton of steel in the whole route are 3.070 t, among which the CO₂ emissions from electric arc furnace steelmaking takes the largest share of 1.400 t. Particularly, excessive CO₂ emissions of 1.419 t are produced because of the utilization of hot metal for electric arc furnace steelmaking. The reason for the excessive use of hot metal is that China’s steel industry is in the developing period, the scrap steel index is low, the recovery and utilization system of scrap steel is incomplete and the price of industrial electricity is high.

Key words: “Chinese style” electric arc furnace steelmaking route; CO₂ emissions; hot metal; emission factor method; scrap steel index

钢铁工业作为能源消耗大户和污染物排放大户,是仅次于电力行业的第二大碳排放源^[1]. 据世界钢铁协会发布数据,2017 年中国粗钢产量达到 8.32×10^8 t,较 2016 年提高 2.9%,占全球粗钢总产量的 49.2%^[2]. 按吨钢 CO₂ 排放量为 1.8 t 来计算,2017 年中国钢铁工业 CO₂ 总排放量约为 15 亿 t^[3],排放量巨大. 因此,钢铁工业碳减排研究对缩减中国 CO₂ 排放至关重要.

现代钢铁企业主要有以铁矿石、焦炭为源头的 高炉-转炉流程和以废钢为源头的电炉炼钢流

程两种典型生产流程^[4],后者可显著减少钢铁企业的碳排放.但是,中国大多数钢铁企业在电炉冶炼过程中加入大量铁水冶炼,造成资源浪费.本文将电炉炼钢工序中加入铁水的这一具有中国特色的钢铁冶炼方式称为“中国式”电炉炼钢流程^[5].本文将深入探讨这种“中国式”电炉炼钢流程的碳排放情况以及在中国出现这种特殊流程的原因,为相关研究和政策制定提供依据和参考.

当前,大多采用由世界钢铁协会提供的排放因子法分析钢铁冶炼 CO₂ 排放情况.其中,部分学者将钢铁生产工序看成“黑箱(不考虑内部要素变化)”,粗略式估算钢铁工业的 CO₂ 排放总量,如文献[6]估算了印度钢铁工业 CO₂ 排放量.部分学者将研究对象集中在以铁矿石、焦炭为源头的高炉-转炉流程的吨钢 CO₂ 排放分析,如文献[7]利用物质流分析方法对中国钢铁企业高炉-转炉流程碳排放进行分析,文献[1]在排放因子的基础上建立了钢铁企业高炉-转炉流程碳素流网络图,文献[5]分别分析了短流程和长流程碳排放情况,并对其进行分析比较.同时还有部分学者集中在钢铁工业的减排分析研究上,如文献[8]探讨了中国 CO₂ 排放形式及其控制技术,文献[9]从优化日本钢铁生产工序的角度对其减碳进行分析,文献[10]对钢铁工业低碳技术及其减碳量进行分析.总之,当前大多数研究集中于高炉-转炉这一生产流程的减碳方面,对电炉炼钢生产流程减排的研究甚少,对中国电炉炼钢流程为何无法实现减碳目的的研究更少,且无法从根本上回应或解决中国电炉炼钢流程碳排放过高这一问题.

本文通过碳排放因子法建立中国电炉冶炼方式 CO₂ 排放桑基图,以此来探求“中国式”电炉炼钢流程的 CO₂ 排放源头,并对造成中国电炉转炉化现状的原因进行阐述和分析.

1 理论方法

本文在采用排放系数法确定系统边界的基础上,进行系统模型的简化,对典型钢铁企业电炉炼钢流程碳排放进行分析.

1.1 系统边界

传统电炉炼钢流程包括电炉炼钢工序、连铸工序和轧钢工序三个主要工序.因国内大部分钢铁企业在电炉炼钢过程中加入铁水,而生产所需铁水会产生大量的 CO₂ 排放,对此,电炉炼钢流程碳排放时需考虑生产铁水所产生的 CO₂ 排放,

即包括上游生产的焦化工序、烧结工序、球团工序和高炉炼铁工序.

根据钢铁生产过程中碳排放特点将其分为直接排放源、间接排放源和碳排放抵扣,如图 1 所示.直接排放源是企业自身化石燃料和熔剂等消耗所产生的 CO₂ 排放,如洗精煤、焦炭、石灰石、白云石等;间接碳排放源是企业外购产品所产生的 CO₂ 排放,如外购电力、外购氧气等;碳排放抵扣是以固定碳形式存在于产品和副产品的等价 CO₂ 的量^[5].

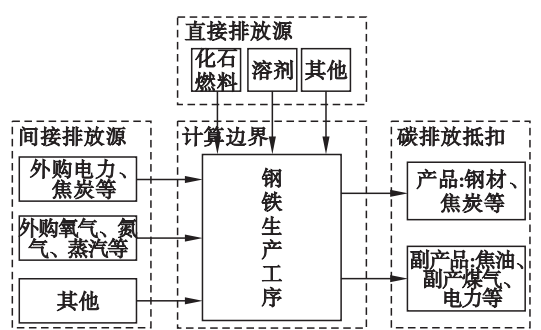


图 1 碳排放分析边界

Fig. 1 Boundary of CO₂ emission analysis

1.2 排放因子法

碳排放因子 F 是根据生产单位产品或消耗单位能源所排放的 CO₂ 的统计平均值得出的一个比较符合实际的排放因子^[11],则某物质或能源的 CO₂ 排放量为

$$G = X \cdot F. \quad (1)$$

式中: G 为 CO₂ 排放量,t; F 为碳排放因子,t/t; X 为不同类型物质或能源的消耗量,t.

排放因子法虽然计算简单,但国家、地区、技术条件和能源结构的不同均会影响排放因子,对此,针对不同生产工艺、规模等因素确定排放因子,建立如下数学通式模型.

结合质量守恒定律和已建立的系统研究边界,得出各工序碳排放量为

$$G = \sum_{i=1}^d X_i \cdot F_{\text{dir},i} + \sum_{j=d+1}^m X_j \cdot F_{\text{ind},j} - \sum_{k=m+1}^n X_k \cdot F_{\text{neu},k}. \quad (2)$$

式中: G 为各工序实际 CO₂ 排放量,t;等式右侧第一项为含碳原料 i 的直接排放量,第二项为动力消耗能源 j 的间接排放量,第三项为产品、副产品 k 的排放抵扣量; $F_{\text{dir},i}$ 为直接碳排放因子, $F_{\text{ind},j}$ 为间接碳排放因子, $F_{\text{neu},k}$ 为碳排放抵扣因子.

2 模型假设

本文结合实际生产情况对电炉炼钢流程进行

如下简化^[1]:

- 1) 连铸工序碳排放量相对很少,故不予以考虑;
- 2) 因各工序无法区分是自发电和外购电,同时大多采用外购电,因此仅在分析总流程时区分自发电和外购电,其他均用外购电;
- 3) 高炉炼铁工序中产生工业炉尘等对碳排放影响小,故不予以考虑;
- 4) 电炉炼钢过程中电极消耗产生碳排放相对较小,故忽略不计。

3 “中国式”电炉炼钢碳排放分析

本文基于酒泉钢铁(集团)公司(以下简称酒钢)的电炉炼钢流程进行分析.2014 年酒钢全年钢产量为 10 343 万 t,居中国第 18 位,所以其生

产流程具有一定的代表性。

本文采用排放因子法建立了基于酒钢集团的“中国式”电炉炼钢流程的 CO₂ 排放桑基图,如图 2 所示。“中国式”电炉炼钢流程的碳排放主要由两部分组成,一是传统的电炉炼钢工序,包括电炉和轧钢两个工序;另一部分是由电炉采用铁水所带来的上游工序,包括焦化、烧结、球团和高炉炼铁 4 个工序.下文将分别从投入端和输出端对其进行分析。

由图 2 可知,“中国式”电炉炼钢流程 CO₂ 的总投入量达 3.209 t.其中,原料消耗(包括废钢、精铁矿和洗精煤)的 CO₂ 投入量为 0.813 t,占总投入量的 25.34%;来自于焦化工序的原材料洗精煤的投入量占比最大,为 0.811 t(占原料消耗的 99.71%),这是由于“中国式”电炉炼钢进程中注入过多铁水,而铁水的冶炼需要上游工序

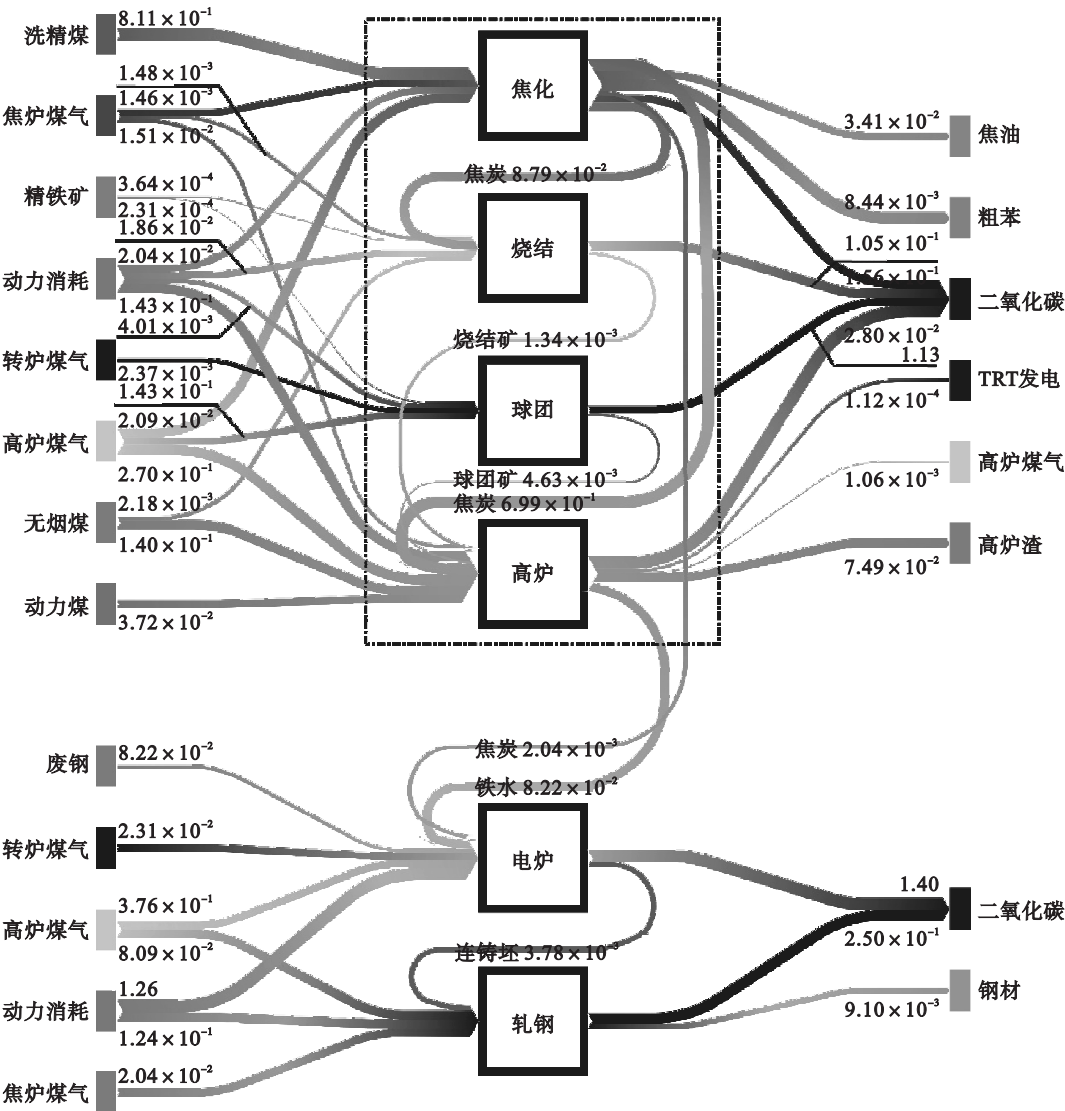


图 2 “中国式”电炉炼钢流程碳素流桑基图(单位:t)

Fig. 2 Carbon flow Sankey diagram of “Chinese style” electric arc furnace steelmaking route (unit: t)

提供原料,因此导致该部分的 CO₂ 的投入;燃料消耗(包括高炉煤气、焦炉煤气、转炉煤气、无烟煤和动力煤)的 CO₂ 的投入量为 0.826 t,占总投入量的 25.74%;转炉煤气、高炉煤气、焦炉煤气、动力煤和无烟煤 CO₂ 投入量分别为 0.025 t,0.552 t,0.069 t,0.037 t 和 0.142 t,可见高炉煤气在整个燃料消耗中 CO₂ 投入量最大,其次为转炉煤气;动力消耗(如电、水、氧气等)中 CO₂ 投入量为 1.570 t,占总投入量的 48.92%,如表 1 所示.从工序上来说,电炉炼钢工序是整个“中国式”电炉炼钢流程动力消耗 CO₂ 投入量最多的工序,为 1.260 t(占动力消耗的 80.25%),其次为高炉炼

铁(0.143 t)和轧钢工序(0.124 t).从能源介质角度来说,电是整个动力消耗 CO₂ 投入量最大的部分,为 1.224 t,占动力消耗的 78.34%,其中的 87.46%(1.071 t)由电炉炼钢工序产生,可见降低电炉工序电耗也是降低碳投入到生产流程的重点.其余的主要由循环水、氧气、高炉鼓风、氮气等产生,仅占动力消耗的 21.66%.此外,由电炉工序注入过多铁水而引入到上游工序的 CO₂ 投入量为 1.581 t,占总输入端的近一半,剩下的 1.628 t 由电炉和轧钢工序输入端产生,可见电炉工序引入过多铁水从源头上就给碳过多排放带来了极大的隐患.

表 1 “中国式”电炉炼钢流程动力消耗情况
Table 1 Power consumption of “Chinese style” electric arc furnace steelmaking route t

类别	焦化	烧结	球团	高炉	电炉	轧钢	合计
电	1.20×10^{-2}	1.55×10^{-2}	3.34×10^{-3}	1.60×10^{-2}	1.07	1.07×10^{-1}	1.22
蒸汽	7.51×10^{-3}	2.85×10^{-3}	7.18×10^{-4}	5.87×10^{-3}	0	5.68×10^{-3}	2.26×10^{-2}
新水	8.25×10^{-5}	2.22×10^{-5}	3.39×10^{-5}	0	0	1.32×10^{-4}	2.71×10^{-4}
空气	3.58×10^{-4}	2.18×10^{-4}	0	1.51×10^{-3}	1.52×10^{-3}	3.45×10^{-3}	7.05×10^{-3}
氮气	4.13×10^{-4}	0	0	1.29×10^{-2}	4.27×10^{-2}	7.58×10^{-3}	6.35×10^{-2}
生活水	0	8.00×10^{-6}	8.29×10^{-6}	2.24×10^{-5}	0	0	3.87×10^{-5}
循环水	0	0	0	8.27×10^{-5}	9.08×10^{-2}	0	9.91×10^{-2}
氧气	0	0	0	4.08×10^{-2}	4.01×10^{-2}	0	8.08×10^{-2}
氩气	0	0	0	0	8.15×10^{-3}	0	8.15×10^{-3}
高炉鼓风	0	0	0	5.70×10^{-2}	0	0	5.70×10^{-2}
合计	2.04×10^{-2}	1.86×10^{-2}	4.10×10^{-3}	1.43×10^{-1}	1.26	1.24×10^{-1}	1.57

从“中国式”电炉炼钢流程输出端来看,由于酒钢在实际生产中未采用 CO₂ 的吸收技术,因此,“中国式”电炉炼钢流程输出端主要以 CO₂ 的形式直接排放到大气中,该部分占总投入量的 96.48%,为 3.07 t,详见表 2.由表 2 可知,焦化、烧结、球团、高炉炼铁、电炉炼钢和轧钢工序的 CO₂ 排放分别为 0.156 t(占 5.08%),0.105 t(占 3.42%),0.028 t(占 0.91%),1.130 t(占 36.82%),1.400 t(占 45.62%)和 0.250 t(占 8.15%).可见,“中国式”电炉炼钢流程的 CO₂ 排放主要来源于电炉炼钢和高炉炼铁工序,共占 CO₂ 总排放量的 82.44%.烧结和球团工序的 CO₂ 排放量占比最小.同时,酒钢在电炉炼钢进程中使用大量的铁水,因此上游工序(焦化、烧结、球团、高炉炼铁)产生的 CO₂ 不得不被考虑在内.电炉炼钢工序产生的废钢为 0.472 t,即生产吨钢需要消耗 0.482 t 废钢和 0.560 t 铁水,由此可

知,生产所需铁水产生的 CO₂ 排放量为 1.419 t,占总排放量的近一半.也就是说,倘若电炉炼钢工序的原材料为废钢时(即全废钢冶炼),其 CO₂ 排放量仅为 1.650 t,比“中国式”电炉炼钢流程的 CO₂ 排放量减少了逾一半.

此外,输出端余下的部分以固定碳形式存在于产品、副产品中,如焦油(0.034 t)、高炉渣(0.075 t)、钢材(0.009 t)等.钢铁生产过程中在消耗大量的一次能源的同时产生大量的二次能源(如高炉煤气等),这部分能源需得到有效的利用,如钢铁企业在煤气自足的基础上将多余的煤气用于发电,以减少外购电量,相当于减少电能的间接碳排放.部分副产品(如高炉渣等)是生产水泥等的良好原料,因此,钢铁企业可与水泥等行业链接,增加高炉渣等副产品的附加值,从而节约资源,降低能耗与 CO₂ 的排放量.

表 2 “中国式”电炉炼钢工序 CO₂ 排放量
Table 2 CO₂ emissions of “Chinese style” electric arc furnace steelmaking route

工序	排放量/t	占比/%
焦化	1.56×10^{-1}	5.08
球团	2.80×10^{-2}	0.91
烧结	1.05×10^{-1}	3.42
高炉	1.13	36.82
电炉	1.40	45.62
轧钢	2.50×10^{-1}	8.15
合计	3.07	100.00

通过上述分析可知,“中国式”电炉炼钢流程并未发挥传统电炉炼钢流程减碳的作用. 以 2017 年为例,中国电炉钢产量为 7.45×10^7 t, 仅占粗钢产量 9.5%, 与世界电炉钢平均占比达 25% 仍存在较大差距,这受到多种因素影响.

首先,电炉炼钢工序注入过多铁水代替废钢,致使其未发挥减碳作用. 然而,在电炉炼钢工序中注入大量铁水进行冶炼在中国并不罕见. 一方面,加入适量铁水的电炉炼钢不仅可以缩短电炉冶炼周期,避免由于使用过多废钢而掺入过多杂质,提高电炉炼钢的生产率和产量,为企业带来极大的经济效益,但是这与电炉冶炼的减排目的背道而驰;另一方面,受到中国当前废钢资源现状的限制. 由图 3 可知,中国粗钢产量呈现飞速增长的趋势,到 2015 年,中国粗钢产量首次出现下降的趋势. 然而在中国粗钢产量快速增长的同时,废钢总量并未随之增长,反而出现下降的趋势. 废钢指数是用来评定一个国家废钢资源充足程度的指标^[11],它是指统计期内国内回收的折旧废钢量与加工废钢量之和与统计期内该国的钢产量之比,该指数与电炉钢比趋势一致,在一定程度上也可以表示为电炉钢比. 废钢指数愈大则废钢资源愈充足,反之,则废钢资源不足. 如图 3 所示,中国自 2001 到 2004 年废钢指数呈增长态势,2004 年达到顶峰(废钢指数为 0.123),随后逐年下降,到 2017 年中国废钢资源又迅猛增长,废钢指数达到 0.124. 尽管如此,中国废钢资源依然短缺,其根本原因是,中国钢铁工业处于成长阶段,废钢积累量小. 同时,中国废钢资源回收系统不完善,导致废钢资源严重短缺. 理论上,电炉钢比在一定程度上也应该快速下降,但由于电炉已具有较高的产能,为了保证设备正常运行,很多钢铁企业被迫用铁水来弥补废钢资源的不足,进一步促进了“中国式”电炉炼钢的发展.

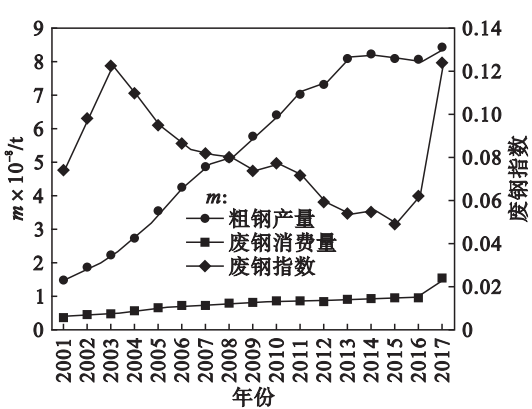


图 3 中国 2001—2017 年粗钢产量、废钢消费量和废钢指数
Fig. 3 Crude steel output, scrap consumption and scrap steel index in China from 2001 to 2017

其次,工业用电价格较高成为电炉炼钢快速发展的另一个制约因素. 整个生产流程电力消耗量最大的工序——电炉炼钢工序,对应电力消耗量为 1 073 kWh/t, 占全流程电力消耗的 87.46%, 电力消耗量巨大;而中国工业过高的用电价格致使个别企业在极端情况下拆除电炉电极,实现电炉转炉化生产,以降低电耗. 同时,热铁水的加入为冶炼提供了热源,从而一定程度上降低了企业电炉炼钢工序运行成本. 图 4 给出了中国重点钢铁企业电炉热铁水的消耗情况,可知,近年来重点企业电炉用热铁水炼钢的比例有所上升,中国钢铁工业电炉炼钢逐步走向转炉化^[12].

第三,中国废钢资源回收系统不完善. 一方面中国废钢资源回收企业的生产设备过于陈旧,生产技术落后,且大多不具备除锈、去杂、分选、精选的技术工艺,产品质量低;另一方面中国的废钢回收企业多而混乱,部分企业未严格执行国家标准,导致废钢资源回收效率低下. 同时,废钢回收企业的混乱导致废钢成分复杂,有害元素含量高,需要添加直接还原铁,否则电炉钢品质下降,而中国又是一个直接还原铁缺乏的国家. 由此可见,发展短流程炼钢对中国来说可谓困难重重. 此外,政府对废钢企业指导、扶持以及管理也是至关重要的. 如图 5 所示,废钢资源主要由企业自产钢、社会采购钢和进口补充钢三部分组成. 作为废钢主要来源,社会自产钢的废钢资源为 $4 \times 10^7 \sim 5 \times 10^7$ t, 仅占废钢资源总量的 50% ~ 60%. 但在 2017 年中国社会采购钢为 1.103×10^8 t, 有大幅度提高,这是由于 2016 年以来中国各地区相继打击“地条钢”,取缔中频炉,导致全国中频炉钢厂大范围停产,之前供应中频炉的 $7 \times 10^7 \sim 8 \times 10^7$ t 的废钢流向转炉和电炉,从而使得部分企业转炉炼钢流

程加大了兑入废钢的比例;同时,闲置的电炉部分恢复了生产,致使 2017 年电炉钢产量增加到 7.45×10^7 t。目前,社会采购钢仍存在巨大潜力,需不断完善废钢回收系统,加强废钢回收。

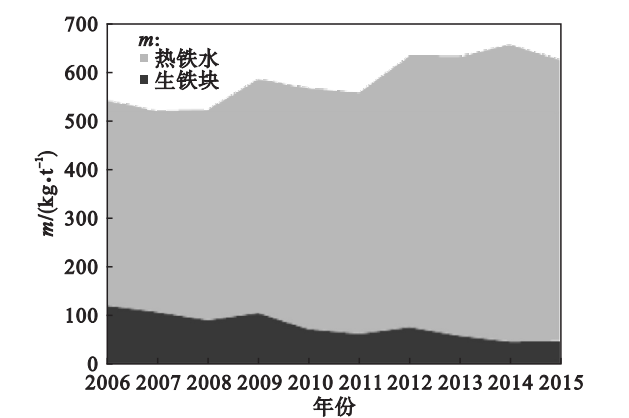


图 4 重点钢铁企业电炉热铁水的消耗情况
Fig. 4 Consumption of hot metal in the electric arc furnace in key steelmaking enterprises

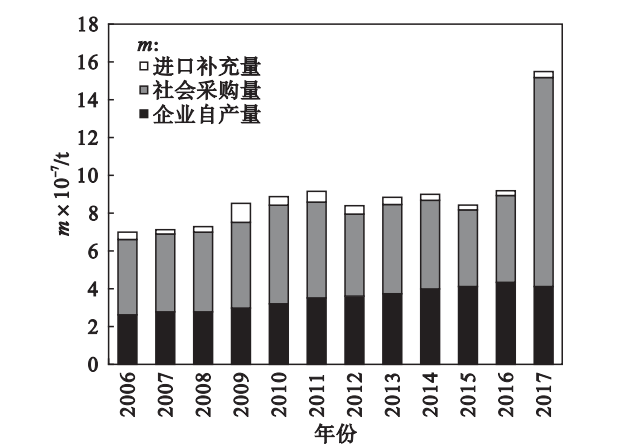


图 5 中国 2006—2017 年废钢消耗情况
Fig. 5 Scrap steel consumption in China from 2006 to 2017

4 结 论

- 1) “中国式”电炉炼钢流程的 CO_2 总投入量为 3.209 t,其主要来自于电力消耗(1.260 t,占总投入量的 39.3%),其次为洗精煤(0.811 t,占总投入量的 25.3%)。可见,为减少电炉炼钢流程的能耗需从节约电能入手,使用清洁能源。
- 2) “中国式”电炉炼钢工序吨钢 CO_2 排放量为 3.07 t,其中电炉工序和因铁水冶炼而增加的工序造成的 CO_2 排放是其主要排放源,分别为 1.400 t(占 45.60%)和 1.130 t(占 36.80%)。

3) 中国钢铁工业处于成长期,废钢指数小,废钢资源短缺;工业用电价格高;废钢回收系统不完善;这些因素是造成中国钢铁工业短流程加入过多铁水的原因。

参考文献:

- [1] Na H M, Gao C K, Zhang M H, et al. Life cycle assessment analysis of the environment load from typical Chinese steel enterprises [J]. *Journal of Environmental Accounting & Management*, 2017, 5(1): 1–9.
- [2] International Steel Association. World steel statistics 2017 [M]. Brussels: Wordsteel, 2017.
- [3] 杨宁川, 黄其明, 何腊梅. 炼钢短流程工艺国内外现状及发展趋势 [J]. 中国冶金, 2010(4): 17–22.
(Yang Ning-chuan, Huang Qi-ming, He La-mei. Current situation and outlook of steelmaking compact process technology domestic and overseas [J]. *China Steel*, 2010 (4): 17–22.)
- [4] 高成康, 陈杉, 陈胜, 等. 中国典型钢铁联合企业的碳足迹分析 [J]. 钢铁, 2015, 50(3): 1–8.
(Gao Cheng-kang, Chen Shan, Chen Sheng, et al. Carbon footprint analysis of typical Chinese iron and steel enterprises [J]. *Steel*, 2015, 50(3): 1–8.)
- [5] Na H M, Gao C K, Tian M Y, et al. MFA-based analysis of CO_2 emissions from typical industry in urban—as a case of steel industry [J]. *Ecological Modelling*, 2017, 365: 45–54.
- [6] Das A, Kandpal T C. Iron and steel manufacturing technologies in India; estimation of CO_2 emission [J]. *International Journal of Energy Research*, 2015, 21(12): 1187–1201.
- [7] Xu W Q, Cao W J, Zhu T Y, et al. Material flow analysis of CO_2 emissions from blast furnace and basic oxygen furnace steelmaking systems in China [J]. *Steel Research International*, 2015, 86(9): 1063–1072.
- [8] Ran R, Weng D. Current situation of CO_2 emission in iron and steel producing and its controlling methods [J]. *Science & Technology Review*, 2006, 24(10): 53–56.
- [9] Ariyama T, Sato M. Optimization of ironmaking process for reducing CO_2 emissions in the integrated steel works [J]. *ISIJ International*, 2006, 46(12): 1736–1744.
- [10] Xu C B, Cang D Q. A brief overview of low CO_2 emission technologies for iron and steel making [J]. *Journal of Iron and Steel Research, International*, 2010, 17(3): 1–7.
- [11] 陆钟武. 论钢铁工业的废钢资源 [J]. 钢铁, 2002, 37(4): 66–70.
(Lu Zhong-wu. On steel scrap resources for steel industry [J]. *Steel*, 2002, 37(4): 66–70.
- [12] Heijungs R, van der Voet E. Practical handbook of material flow analysis [J]. *Journal of Industrial Ecology*, 2004, 9(5): 337–338.