

基于碳素流分析炼焦生产 CO₂ 排放及减排措施

徐文青,曹万杰,万斌,叶猛,朱廷钰

(中国科学院过程工程研究所 北京市过程污染控制工程技术研究中心 湿法冶金清洁生产技术国家工程实验室,北京 100190)

摘要:为了降低钢铁企业炼焦生产 CO₂ 排放量,应用物质流分析法,建立炼焦生产 CO₂ 排放计算模型,以某钢铁联合企业的实际炼焦生产为基础,进行含碳材料取样和检测,定量分析炼焦生产中各碳源和碳汇对 CO₂ 排放的影响。研究表明,该钢铁企业 65 孔和 36 孔焦炉,吨焦炭生产所需炼焦煤分别涉及 986.76 和 984.87 kg 碳元素的转化,其中,80.40% 和 80.65% 的碳元素转移至焦炭,即碳元素有效利用率为 80.40% 和 80.65%,剩余 19.60% 和 19.35% 的碳元素转移到其他产物中。炼焦生产潜在存在大量 CO₂ 排放;增大炭化室容量可减少炼焦生产 CO₂ 排放,采用焦炉煤气回收、粗苯和煤焦油回收、干熄焦和煤调湿技术可降低炼焦生产 CO₂ 排放量。

关键词:炼焦;CO₂ 排放;CO₂ 减排;碳素流分析;模型

中图分类号:X321 文献标志码:A 文章编号:1006-6772(2015)02-0010-04

Emission calculation and reduction measures of CO₂ from coking based on carbon flow analysis

XU Wenqing, CAO Wanjie, WAN Bin, YE Meng, ZHU Tingyu

(Beijing Engineering Research Center of Process Pollution Control, National Engineering Laboratory for Hydrometallurgical Cleaner Production Technology, Institute of Process Engineering, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China)

Abstract: In order to reduce CO₂ emissions from coking in iron and steel enterprises, a calculation model of CO₂ emissions was established based on material flow analysis. Based on the practical production data of one iron and steel enterprise, the sources and sink of carbon in coking were analyzed. The results showed that, the enterprise adopted 65 and 36 holes ovens, one ton coke production involved 986.76 and 984.87 kg carbon conversion respectively. Among them, about 80.40% and 80.65% carbon element transferred to coke, in other words, the effective utilization rate of carbon element was 80.40% and 80.65%, the rest carbon transferred to other products. Increasing coking chamber capacity, recycling coke oven gas, crude benzene and coal tar, adopting coal moisture technologies could decrease CO₂ emissions.

Key words: coking; CO₂ emissions; CO₂ reduction; carbon flow analysis; model

0 引 言

CO₂ 排放控制和减排已成为人类缓解全球气候变化所面临的紧迫任务。我国钢铁工业 CO₂ 排放量约占我国总排放的 15%^[1]。我国钢铁工业“十二五”发展规划要求钢铁工业单位工业增加值 CO₂ 下降 18%^[2],减少 CO₂ 排放已经成为钢铁工业发展一个亟待解决的问题。炼焦是钢铁生产的重要工序,

其 CO₂ 排放量约占钢铁工业总排放的 9%^[3]。炼焦产生的冶金焦是高炉冶炼不可缺少的材料,支撑高炉内料柱,并提供冶炼所需热量及还原气氛。2012 年我国重点大中型钢铁联合行业焦炭产量为 1.26 亿 t^[4],理清炼焦生产中碳元素的来源和去向,可为降低炼焦生产 CO₂ 排放提供理论依据。

Sakamoto 等^[3]利用日本钢铁行业统计信息,计算日本炼焦生产 CO₂ 排放量为 585.6 kg/t(t 为焦炭

收稿日期:2014-10-27;责任编辑:孙淑君 DOI:10.13226/j.issn.1006-6772.2015.02.003

基金项目:中国科学院战略性先导科技专项资助项目(XDA05010103)

作者简介:徐文青(1983—),女,山西临汾人,副研究员,博士,从事大气污染物控制方面的科研工作。E-mail:wqxu@ipe.ac.cn。通讯作者:朱廷钰,E-mail:tyzhu@ipe.ac.cn

引用格式:徐文青,曹万杰,万斌,等.基于碳素流分析炼焦生产 CO₂ 排放及减排措施[J].洁净煤技术,2015,21(2):10-13.

XU Wenqing, CAO Wanjie, WAN Bin, et al. Emission calculation and reduction measures of CO₂ from coking based on carbon flow analysis[J]. Clean Coal Technology, 2015, 21(2): 10-13.

消耗量,下同)。联合国政府间气候变化专门委员会(IPCC)^[5]在国家温室气体清单中构建了炼焦生产 CO₂ 排放计算方法,该方法适用于计算国家和地区层次炼焦生产 CO₂ 排放量。盛刚等^[6]对钢铁联合企业炼焦、烧结、高炉炼铁等工序以模型构建为重点进行碳素流分析,未定量分析各碳素流。Hu 等^[7]对高炉炼铁系统进行物质和能量分析,将炼焦看作高炉系统的一部分,因此仅分析炼焦煤、焦炭和焦炉煤气物料的碳素流,并未对炼焦生产进行 CO₂ 排放计算。上官钦等^[8]对钢铁企业进行工序层面碳素流计算,获得炼焦过程直接 CO₂ 排放量为 493.48 kg/t,未提供炼焦过程各碳素流信息。笔者结合前人在炼焦 CO₂ 排放计算研究工作,对我国钢铁联合企业炼焦生产进行碳素流定性和定量分析,并分析各减排技术对炼焦工序 CO₂ 排放的影响。

1 物质流分析法

物质流分析(Material Flow Analysis)是在给定的时空系统内对物质流动与储存规律进行评价的一种系统分析方法。物质流分析以物质守恒定律为基础,通过对特定系统内的投入物料与产出产物进行平衡分析,定性并定量地描述和模拟系统内物质流动状态和过程,揭示系统物质来源、路径、中间存储和最终散失的信息,资源消耗量、废物产生量和环境负载度的信息^[9-10]。

本文采用物质流分析法对钢铁企业炼焦生产进行碳素流分析,如图 1 所示。炼焦煤经粉碎、配料、装料后,输送至炭化室,在燃烧室热量作用下干馏获得焦炭和荒煤气。焦炭经熄焦、分级获得焦炭和焦粉、焦块(不合格焦炭),荒煤气经煤气处理获得焦炉煤气、煤焦油、粗苯、硫磺等副产品。生产获得焦炭用于高炉冶炼,焦粉和焦块粉碎后用于烧结,焦炉煤气用于炼焦燃烧室燃料、烧结点火燃料、轧钢加热炉燃料等燃烧使用,剩余煤气外送厂外使用或用于煤气发电,粗苯、煤焦油外送作为化工原料。

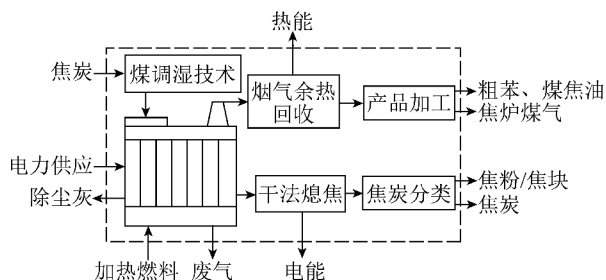


图 1 典型钢铁联合企业炼焦生产示意

2 CO₂ 计算模型

炼焦过程的 CO₂ 排放包括直接 CO₂ 排放、间接 CO₂ 排放和碳抵扣 3 部分^[11],具体见公式(1)。直接 CO₂ 排放源于炼焦过程中焦炉煤气放散,粗苯和煤焦油未回收和提供干馏热量而消耗能源引起的 CO₂ 排放。直接 CO₂ 排放采用元素守恒计算,即 CO₂ 所含碳元素为输入炼焦工序的碳元素与未以 CO₂ 形式排放到大气的碳元素的差值,见公式(2)。间接 CO₂ 排放是指炼焦过程所使用,但 CO₂ 排放发生在炼焦生产外的排放量,源自因动力等消耗电力引起的 CO₂ 排放。碳抵扣是指干熄焦热量回收电力而抵扣的 CO₂ 量。焦炉煤气用于发电和外送炼焦外使用而排放的 CO₂,不计入炼焦生产 CO₂ 排放内。间接 CO₂ 排放和抵扣量见公式(3)。

$$E_{\text{CO}_2} = E_{\text{CO}_2, \text{direct}} + E_{\text{CO}_2, \text{indirect}} - E_{\text{CO}_2, \text{offset}} \quad (1)$$

$$E_{\text{CO}_2, \text{direct}} = \left[\sum_i (M_i C_i) - \sum_j (N_j C_j) \right] \times \frac{44}{12} \quad (2)$$

$$E_{\text{CO}_2, \text{indirect/offset}} = P \times EF_{\text{CO}_2} \quad (3)$$

式中: E_{CO_2} 为炼焦生产中单位产品排放的 CO₂ 量, kg/t; $E_{\text{CO}_2, \text{direct}}$ 为炼焦生产中单位产品直接排放 CO₂ 量, kg/t; $E_{\text{CO}_2, \text{indirect}}$ 、 $E_{\text{CO}_2, \text{offset}}$ 分别为炼焦生产中单位产品间接排放和碳抵扣的 CO₂ 量, kg/t; M_i 为炼焦生产中单位产品对应输入的含碳材料,包括炼焦煤和提供干馏热量的能源, kg/t; N_j 为炼焦生产中单位产品对应未以 CO₂ 形式输出的含碳材料,包括焦炭、焦炉煤气、焦粉/焦块、粗苯、煤焦油和除尘灰, kg/t; C_i 为单位材料含碳量, kg/kg; P 为炼焦过程中消耗的电力和干熄焦产生的电力量, kWh/t; EF_{CO_2} 为生产单位电力排放的 CO₂ 量,为 1.02 kg/kWh^[12]。

3 结果和分析

3.1 计算结果

对国内某钢铁企业的炼焦工序进行含碳材料取样和生产数据调研。该企业主要产品有板、棒、线、型 4 类钢材,所消耗的化石燃料以煤为主,所用煤全部来源于国内。所用铁矿石主要来源于企业自有矿山开采,同时每年外购铁矿石近 2000 万 t,主要来自澳大利亚,并呈逐年增加的趋势。所取样品经碳硫分析仪(LECO-CS-344)和元素分析仪(Vario EL III)检测含碳量。炼焦生产涉及的炼焦煤、焦炭、焦粉、焦块、粗苯、煤焦油、除尘灰、焦炉煤气含碳量分别为 69.58、79.31、83.35、85.45、80.39、88.91、

76.91、44.80 kg(每100 kg含碳材料),焦炉煤气热值是16500 kJ/m³。其中焦炉煤气无法采集,其含碳量采用钢铁企业提供的参数。

该钢铁企业配置65孔和36孔2类焦炉,其炼焦生产各碳素流见表1。2类焦炉的碳素流定量分析如图2所示。

表1 炼焦生产碳素流分析

项目	消耗量/(kg·t ⁻¹)		碳素流/kg	
	65孔	36孔	65孔	36孔
炼焦煤	1418.17	1415.45	986.76	984.87
焦炭	1000.00	1000.00	793.10	798.10
焦粉/焦块	61.50	61.50	51.40	51.40
粗苯	10.47	10.34	9.66	9.54
煤焦油	38.25	37.21	23.71	23.07
除尘灰	28.00	28.00	21.53	21.53
焦炉煤气回收	226.92*	271.82*	45.31*	54.27
焦炉煤气放散	0	0	0	0
焦炉煤气外送	209.15*	158.87*	41.75*	31.72

注: *数据单位为m³/t

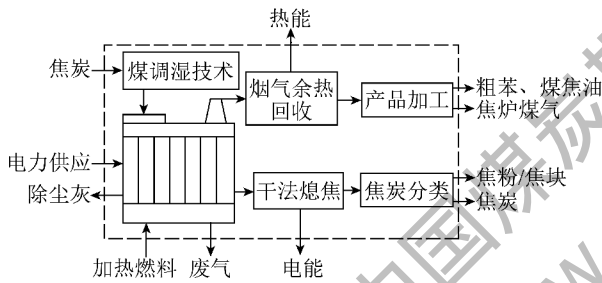


图2 典型钢铁联合企业炼焦碳素流程

根据式1~式3,可计算65孔和36孔2类焦炉生产CO₂排放量,见表2。

表2 炼焦生产CO₂排放量

项目	CO ₂ 排放量/(kg·t ⁻¹)	
	65孔	36孔
直接排放量	167.20	199.86
间接排放量	80.75	83.64
抵消量	56.29	61.64
总排放量	191.66	221.86

3.2 分析

炼焦作为能源转化过程,涉及大量碳元素的转化。该钢铁企业65孔和36孔焦炉生产所需炼焦煤涉及碳元素的转化量分别为986.76和984.87 kg/t,潜在存在大量CO₂排放。各炼焦产品中,含碳量占据前2位的产物为焦炭和焦炉煤气。在65孔和36孔焦炉中,焦炭含碳量分别占总碳量的

80.40%和80.65%,焦炉煤气含碳量分别占8.83%和8.69%,焦粉/焦块各占5.21%和5.19%,煤焦油各占2.40%和2.33%,除尘灰均占2.18%,粗苯各占0.98%和0.96%,如图3所示。该钢铁企业中炼焦煤中80.40%和80.65%碳元素转移至焦炭,即碳元素有效利用率为80.40%和80.65%;剩余19.60%和19.35%的碳元素转移到其他产物中。

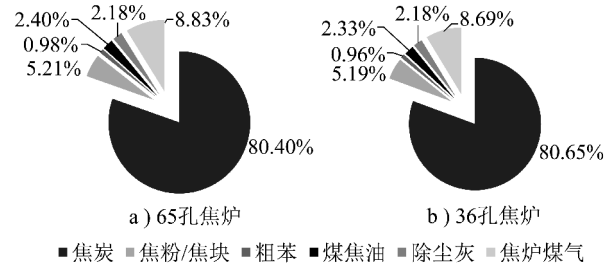
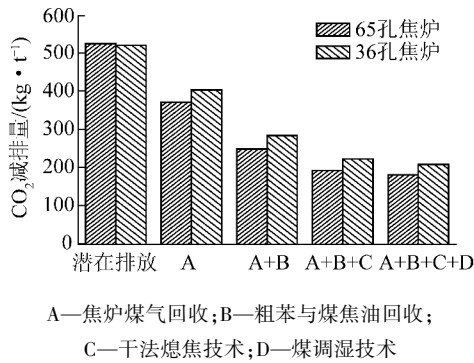


图3 炼焦生产输出碳素流比例

由表2可知,65孔和36孔焦炉炼焦直接CO₂排放分别为167.20和199.86 kg/t,分别占总排放量的67.3%和70.6%。因该钢铁企业不存在焦炉煤气放散,且回收粗苯和煤焦油,其炼焦生产直接CO₂排放主要来自回炉作为干馏燃料使用的焦炉煤气。该钢铁企业焦炉煤气热值为16500 kJ/m³,65孔和36孔焦炉干馏中,焦炉煤气消耗量分别为226.92和271.82 m³/t,干馏过程消耗热量为3.74和4.48 GJ/t。提供干馏热量产生CO₂量同加热燃料的单位热值成负相关,含碳量成正相关。以焦炉煤气、高炉煤气和转炉煤气为例,三者其含碳量分别为12.1、70.8和49.6 kg/GJ^[5],即产生等量热值的高炉煤气和转炉煤气,其CO₂排放量分别为焦炉煤气的5.9倍和4.1倍。如果采用高炉煤气或转炉煤气替代焦炉煤气提供干馏热量,则焦炉工序直接CO₂排放量分别增加为5.9倍或4.1倍。

4 节能减排措施

炼焦煤中19.60%和19.35%的碳元素转移到副产品中,因此副产品回收利用影响直接CO₂排放。各减排技术对炼焦工序CO₂的影响如图4所示。由图4可知,65孔和36孔焦炉充分回收焦炉煤气,可分别减排CO₂153.08和116.31 kg/t,充分回收粗苯和煤焦油化学品,可分别减排122.36和119.57 kg/t。图4中潜在排放是指65孔和36孔焦炉无任何减排技术而排放的CO₂量,其数值分别为523.39和519.38 kg/t,随着采用不同类减排技术,其CO₂量逐渐降低。

图 4 各减排技术对炼焦工序 CO₂ 的影响

炼焦生产存在大量余热,其中焦炭、荒煤气和烟道气携带的显热分别占焦炉总量的 39.4%、30.7% 和 16.2%^[13]。利用干法熄焦技术回收^[14]红焦显热发电可产生碳抵扣量,降低炼焦工序 CO₂ 排放。65 孔和 36 孔焦炉干熄焦技术可抵扣 CO₂ 56.29 和 61.64 kg/t。利用煤调湿技术^[15]回收荒煤气和烟道气余热,降低配煤水分,可降低干馏过程燃料消耗。调研企业当前未应用煤调湿技术,煤调湿技术 CO₂ 减排采用文献^[16]数据:配煤水分降低 2.2%,吨焦炭回炉焦炉煤气减少 7% 计算,65 孔和 36 孔焦炉煤调湿技术可减排 CO₂ 11.63 和 13.93 kg/t。

另外,焦炉炭化室容量是影响炼焦生产 CO₂ 排放的因素。65 孔焦炉较 36 孔焦炉降低 CO₂ 30.20 kg/t,其原因是炼焦为间歇性生产,增大炭化室可减少出炉次数,降低因开炉引发的炭化室的热量散失,从而减少干馏能源的消耗量^[15,17]。

5 结 论

1) 炼焦工序是能源转化过程,焦炭涉及大量碳元素的转化。如 65 孔和 36 孔焦炉,每吨焦炭生产所需炼焦煤分别涉及 986.76 和 984.87 kg 碳元素的转化。其中,焦炭含碳量占总碳量的 80.40% 和 80.65%,其他副产品占 19.60% 和 19.35%,炼焦生产潜在存在大量 CO₂ 排放。

2) 联合钢铁企业焦炉炭化室容积和节能技术影响 CO₂ 排放量。如 65 孔焦炉较 36 孔焦炉可减排 CO₂ 30.20 kg/t,65 孔和 36 孔焦炉采用焦炉煤气回收可分别减排 CO₂ 153.08 和 116.31 kg/t,粗苯和煤焦油回收可减排 CO₂ 122.36 和 119.57 kg/t,干熄焦技术可减排 CO₂ 56.29 和 61.64 kg/t,煤调湿技术可减排 CO₂ 11.63 和 13.93 kg/t。

参考文献:

[1] 徐匡迪. 低碳经济与钢铁工业[J]. 钢铁,2010,45(3):1-12.

- [2] 中华人民共和国工业和信息化部. 钢铁工业“十二五”发展规划[EB/OL]. (2011-11-07)[2014-10-27]. http://www.gov.cn/zw/gk/2011-11/07/content_1987459.htm.
- [3] Sakamoto Y, Tonooka Y. Estimation of CO₂ emission for each process in the Japanese steel industry; a process analysis[J]. International Journal of Energy Research, 2000, 24(7): 625-632.
- [4] 中国钢铁工业协会. 中国钢铁工业年鉴 2013[M]. 北京: 中国钢铁工业协会, 2013.
- [5] Eggelston S, Buendia L, Miwa K, et al. 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories[R]. IPCC: IGES, 2006.
- [6] 盛刚, 孙彦广, 徐化岩, 等. 钢铁联合企业工序碳素流模型构建及 CO₂ 排放研究[J]. 中国冶金, 2011, 21(7): 1-6.
- [7] Hu Changqing, Han Xiaowei, Li Zhihong, et al. Comparison of CO₂ emission between COREX and blast furnace iron-making system[J]. Journal of environmental sciences, 2009, 21(S1): 116-120.
- [8] 上官方钦, 张春霞, 胡长庆, 等. 中国钢铁工业的 CO₂ 排放估算[J]. 中国冶金, 2010, 20(5): 37-42.
- [9] Brunner P H, Rechberger H. Practical handbook of material flow analysis[M]. Florida: Lewis Publishers, 2003: 3-30.
- [10] Paul H Brunner. Material flow analysis: vision and reality[J]. Journal of Industrial Ecology, 2001, 5(2): 3-5.
- [11] 上官方钦, 张春霞, 郇秀萍, 等. 关于钢铁行业 CO₂ 排放计算方法的探讨[J]. 钢铁研究学报, 2010, 22(11): 1-5.
- [12] 汪刚, 冯霄. 基于能量集成的 CO₂ 减排量的确定[J]. 化工进展, 2006, 25(12): 1467-1470.
- [13] 胡长庆, 张春霞, 张旭孝, 等. 钢铁联合企业炼焦过程物质与能量流分析[J]. 钢铁研究学报, 2007, 19(6): 17-20.
- [14] 蔡九菊. 中国钢铁工业能源资源节约技术及其发展趋势[J]. 世界钢铁, 2009(4): 1-13.
- [15] 刘耀东. 我国焦炭工业现状、问题及其调整建议[J]. 中国能源, 2009, 31(1): 7-13.
- [16] 张国庆, 张琼芳, 刘勇刚. 焦炉烟道废气-流化床式煤调湿技术的应用[J]. 燃料与化工, 2010, 41(6): 9-11.
- [17] Walter E Buss, 孙可. 欧洲炼焦工业的发展趋势及方向[J]. 燃料与化工, 2004, 35(5): 49-53.

征 订 启 事

2015 年《煤炭科学技术》杂志定价: 25 元/册, 全年 12 期共 300 元(含邮费)。本刊可邮局订阅, 邮发代号: 80-337, 也可直接向本编辑部索取订单并办理订购业务, 欢迎随时订阅。

汇款地址: 北京市和平里青年沟路 5 号煤炭科学研究总院《煤炭科学技术》编辑部(100013)

联系电话: (010)84262926-8002

传 真: (010)84262114

电子信箱: cst410@china.com

网 址: www.mtkxjs.com.cn