

# 典型钢铁企业物能消耗与烟粉尘排放分析

李小玲, 孙文强, 赵亮, 蔡九菊

(东北大学 国家环境保护生态工业重点实验室, 辽宁 沈阳 110819)

**摘 要:** 以典型钢铁生产企业为研究对象, 基于企业实际生产数据, 采用物质流分析法(MFA), 构建物质代谢模型. 建立了能源、资源利用和污染物排放分析指标, 定量描述了钢铁企业的资源能源消耗及烟粉尘排放情况. 结果表明: 企业层面, 高炉-转炉长流程吨钢总资源消耗量为 208.6 t, 燃料能消耗量占能源消耗总量的 93.9%, 吨钢烟粉尘排放量为 648.08 g, 烧结和炼铁工序贡献最大, 分别占总排放量的 45% 和 36%. 电炉短流程总资源消耗量为 1.31 t, 电能消耗量占能源消耗总量的 96.7%, 吨钢烟粉尘排放量 67 g. 工序层面, 烧结、炼焦和炼铁三个主排放工序的排放量分别为 222.50 g/t 烧结矿、118.20 g/t 焦、245.27 g/t 铁. 据此, 提出企业节能减排和产业结构调整的方向性建议, 以减少环境压力, 实现钢铁企业的可持续发展.

**关 键 词:** 钢铁生产企业; 物质流分析法(MFA); 资源能源消耗; 烟粉尘排放; 节能减排

中图分类号: X 506 文献标志码: A 文章编号: 1005-3026(2016)03-0352-05

## Energy Consumption and Smoke and Dust Emissions Analysis of Typical Iron and Steel Production Enterprise

LI Xiao-ling, SUN Wen-qiang, ZHAO Liang, CAI Jiu-ju

(SEP Key Laboratory of Eco-industry, Northeastern University, Shenyang 110819, China. Corresponding author: SUN Wen-qiang, E-mail: neu20031542@163.com)

**Abstract:** Taking a typical iron and steel production enterprise as the research object, based on the practical production data of enterprise, substance metabolism model was constructed by using material flow analysis method (MFA). According to energy use, resource use and pollutant emissions indexes, resources and energy consumption and smoke and dust emissions situation of the iron and steel production enterprises were quantitatively described. The results showed that for enterprises, the total resource consumption per ton of steel of the blast furnace converter's long process is 208.6 t. Fuel consumption is 93.9% of the total energy consumption. The smoke and dust emission per ton of steel is 648.08 g, of which sintering and iron-making process make the biggest contribution and account for 45 percent and 36 percent, respectively. The total resource consumption of electric furnace's short process is 1.31 t, of which electrical energy consumption is 96.7% of the total energy consumption and the smoke and dust emissions per ton of steel is 67 g. As for processes, the emissions of sintering, coking and iron-making process are 222.50 g/t sinter, 118.20 g/t coke and 245.27 g/t iron. Accordingly the directional advices on energy-saving and emission reduction in enterprises and the adjustment of industrial structure are put forward to reduce the pressure on the environment and realize the sustainable development of iron and steel enterprises.

**Key words:** iron and steel production enterprise; material flow analysis (MFA) method; resources and energy consumption; smoke and dust emission; energy-saving and emission reduction

收稿日期: 2015-01-21

基金项目: 国家环境保护公益性行业科研专项(201409023).

作者简介: 李小玲(1982-), 女, 青海西宁人, 东北大学博士研究生; 蔡九菊(1948-), 男, 辽宁凌海人, 东北大学教授, 博士生导师.

近年来,我国多地持续出现严重的灰霾天气.减少以可吸入颗粒物( $\text{PM}_{10}$ )、细颗粒物( $\text{PM}_{2.5}$ )和总悬浮颗粒物(TSP)为特征污染物的烟粉尘排放,是有效缓解我国灰霾天气、改善城市空气质量的主要途径之一.我国钢铁工业的烟粉尘治理,迫在眉睫.据中国钢铁工业协会统计,2012 年全国重点统计企业的吨钢烟粉尘排放量为  $0.99\text{ kg/t}$  钢,韩国浦项钢铁公司 2011 年的排放量仅为  $0.11\text{ kg/t}$  钢.如果我国钢铁企业的烟粉尘排放指标达到国外先进水平,其排放总量将降低一半以上.

物质流分析(material flow analysis, MFA)是对某个区域的物质出入量进行定量和定性分析的一种方法,是在工业代谢理论和社会代谢理论基础上提出的<sup>[1-9]</sup>.目前,利用物质流分析方法对钢铁生产企业的生产过程及烟粉尘排放进行分析并找到关键技术点的研究较少.为此,选择一个典型钢铁生产企业,选择钢铁生产过程为一个系统,利用物质流分析法构建物质代谢模型,通过投入指标、消耗指标和产出指标的计算分析,力求找到钢铁企业烟粉尘排放指标的影响因素,提出企业节能减排和产业结构调整的方向性建议,推动钢铁行业的可持续发展.

1 研究方法

1.1 物流模型

冶金工业属于流程制造业,流程制造业是以

天然资源为初始原料,在输入能源的支持下,按特定的工艺流程加工出期望产品的过程工业,经过若干道生产工序,经一系列物理和化学变化,且每道工序均消耗能源和非能源,还产生各种废弃物和副产品,各工序的产出产品(中间产品)作为下一工序的物质投入,如图 1 所示.

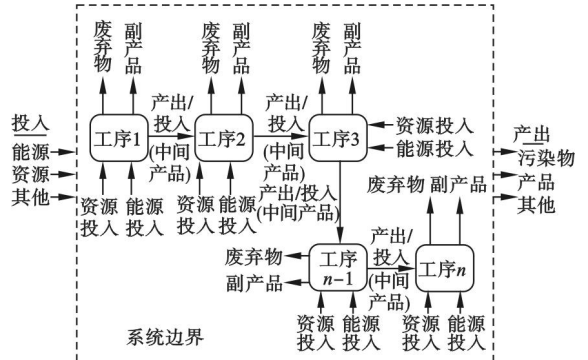


图 1 流程制造业生产过程物流模型

Fig. 1 Production material flow model of flow manufacturing

1.2 研究边界

本研究的系统边界界定为钢铁产品的生产过程及其周边环境,包括烧结、炼焦、炼铁、炼钢、铸钢及轧钢等工序,周边环境是指外部能源和资源的投入、内部产品的产出及污染物和废弃物的排放等.只考虑生产过程各工序的资源能源消耗和烟粉尘排放,暂不考虑诸如原材料的获取、加工、销售等过程,如图 2 所示.

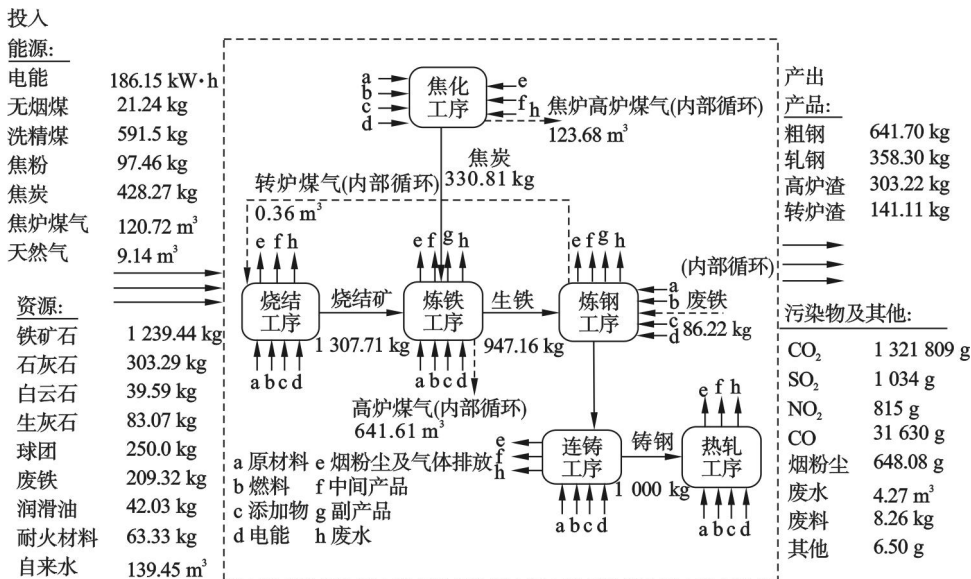


图 2 某钢铁企业高炉-转炉长流程代谢平衡图

Fig. 2 Metabolic balance diagram of BF-BOF process in an iron and steel enterprise

1.3 研究思路及数据采集

选取典型钢铁生产企业作为研究对象,基于

企业实际生产数据,采用物质流分析法(MFA),根据物质流分析指标量化描述资源能源消耗和

烟粉尘排放的情况,分析生产各工序的物质代谢情况,力图找到企业实现“低耗、高产、减排”的有效途径.

采用的基础数据来自某钢铁企业实际生产数据和环境监测数据(由于钢铁企业数据不易获得,因此仅选取一个生产能力和设备具有代表性的企业进行分析研究).以生产 1t 钢统计,钢铁企业生产长流程和短流程代谢平衡图如图 2,图 3 所示.长流程投入产出表如表 1,表 2 所示,其中外部流和内部流分别指研究边界外与系统相关的物质流动和研究边界内的中间产品.高炉煤气、焦炉煤气和转炉煤气及部分废铁用于系统内部循环.

1.4 分析指标

在参照欧盟物质流分析指标的基础上,结合钢铁企业实际情况,采用以下三大类指标,即能源利用指标、资源利用指标和污染物排放指标<sup>[10]</sup>.

1) 能源利用指标:

$$E_e = E_{TOE}/S_p;$$
$$E_h = E_{TOH}/S_p;$$
$$E_t = E_{TOE} + E_{TOH}.$$

(1)

(2)

(3)

式中: $E_e$  表示单位产品(或工序产品)耗电量, $\text{kW}\cdot\text{h}/\text{t}$ ; $E_h$  表示单位产品(或工序产品)燃料能消耗量, $\text{MJ}/\text{t}$ ; $E_t$  表示能源消耗总量, $\text{MJ}$ ; $E_{TOE}$  指投入的电能, $\text{kW}\cdot\text{h}$ ; $E_{TOH}$  指投入燃料的热能, $\text{MJ}$ ; $S_p$  指总产品输出量, $\text{t}$ .

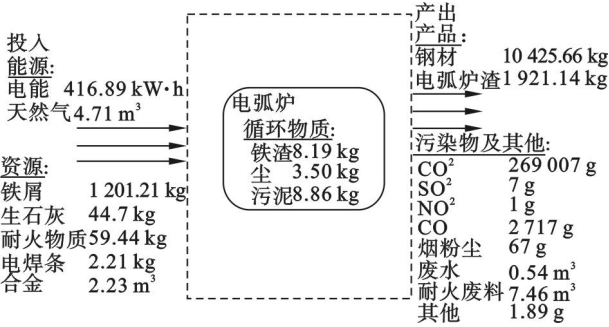


图 3 某钢铁企业电炉短流程代谢平衡图  
Fig. 3 Metabolic balance diagram of EAF process in an iron and steel enterprise

表 1 某钢铁企业高炉-转炉长流程资源能源投入表  
Table 1 Resources and energy input table of BF-BOF process in an iron and steel enterpris

投入	单位	烧结 工序	炼焦 工序	炼铁 工序	炼钢 工序	连铸 工序	热轧 工序	外部流	内部流 中间产品
铁矿石	kg/t 钢	1 202. 68		36. 76				1 239. 44	
石灰石	kg/t 钢	180. 16						180. 16	
白云石	kg/t 钢	34. 25			5. 34			39. 59	
生石灰	kg/t 钢	20. 61			62. 46			83. 07	
球团	kg/t 钢			250. 00				250. 00	
润滑油	kg/t 钢	3. 50		2. 19		2. 46	33. 85	42. 00	
耐火材料	kg/ t 钢				63. 19	0. 14		63. 33	
自来水	m³/t 钢			0. 35	90. 60	0. 54	13. 27	104. 76	
废铁	kg/t 钢				295. 54			209. 32	86. 22
烧结矿	kg/t 钢			1 307. 71					1 307. 71
生铁	kg/t 钢				947. 16				947. 16
粗钢	kg/t 钢					1 042. 66			1 042. 66
铸钢	kg/t 钢						358. 30		358. 30
循环冷却水	m³/t 钢	0. 43	0. 536	23. 08		9. 78	1. 40		35. 23
电能	kW·h/t 钢	79. 2	29. 8	25. 52	27. 80	10. 62	40. 49	213. 44	
无烟煤	kg/t 钢	10. 56		10. 68				21. 24	
洗精煤	kg/t 钢		591. 5					591. 5	
焦粉	kg/t 钢	59. 83						59. 83	
焦炭	kg/t 钢			428. 27				97. 46	330. 81
焦炉煤气	m³/t 钢	4. 81	3. 5	72. 76	3. 85		38. 76		123. 68
天然气	m³/t 钢			0. 39	0. 41	0. 10	2. 71	3. 61	
高炉煤气	m³/t 钢	7. 25	438. 92	596. 06	8. 45		28. 65		1 079. 33
转炉煤气	m³/t 钢	0. 36							0. 36

2) 资源利用效率:

$$M_i = M_{Tti}/T_o.$$
 (4)

式中: $M_i$  表示单位产品(或工序产品)总资源消耗量,t/t; $M_{Tti}$ 指各种资源总投入量,t; $T_o$ 指中间或最终产品的总产出量,t.

3) 污染物排放指标:

$$D_i = T_i/T_o.$$
 (5)

式中: $D_i$  表示单位产品(或工序产品)第*i*种污染物排放量,g/t; $T_i$ 表示中间或最终产品输出排放的第*i*种污染物的量.

2 物质代谢分析

2.1 企业层面烟粉尘排放分析

根据上述生产数据及分析指标,可计算该钢

铁企业生产流程物质代谢数据结果,见表 3.

由表 3 可知,高炉-转炉长流程吨钢烟粉尘排放量是电炉短流程排放量的近 10 倍,究其原因主要是能源结构不同引起的.长流程吨钢能源消耗总量是短流程的近 7.5 倍,燃料能消耗量大导致烟粉尘排放量大,因为烟粉尘细颗粒物主要来源于燃料燃烧.而吨钢烟粉尘排放量的主要贡献者是烧结和炼铁工序,分别占排放总量的 45% 和 36%.此外,吨钢总资源消耗及利用率也是影响烟粉尘排放的主要因素之一,资源消耗量越少,利用率越高,烟粉尘排放量就越小.

2.2 工序层面烟粉尘排放分析

工序层面物质代谢分析结果见表 4.各工序中,炼铁、烧结和炼焦工序的单位产品烟粉尘排放量较大,分别为245.27g/t铁、222.50g/t烧结矿、

表 2 某钢铁企业高炉-转炉长流程产出表

Table 2 Output table of BF-BOF process in an iron and steel enterprise

投入	单位	烧结 工序	炼焦 工序	炼铁 工序	炼钢 工序	连铸 工序	热轧 工序	外部流	内部流 中间产品
烧结矿	kg/t 钢	1 307.71							1 307.71
焦炭	kg/t 钢		330.81						330.81
生铁	kg/t 钢			947.16					947.16
产粗钢	kg/t 钢				1 042.66				1 042.66
品铸钢	kg/t 钢					1 000.00		641.70	358.30
轧钢	kg/t 钢						358.30	358.30	
副产品									
高炉渣	kg/t 钢			303.22				303.22	
转炉渣	kg/t 钢				141.11			141.11	
烟粉尘	g/t 钢	291.48	39	233	82.9		1.68	648.08	
主要 SO <sub>2</sub>	g/t 钢	1 014		10	6		4	1 034	
污 NO <sub>x</sub>	g/t 钢	773		18	4		21	815	
染 CO <sub>2</sub>	g/t 钢							1 321 809	
物 CO	g/t 钢							31 630	

表 3 某钢铁企业生产流程物质代谢分析(企业层面)

Table 3 Material metabolism analysis of the iron and steel enterprise production(enterprise level)

分析指标	高炉-转炉长流程							电炉短流程
	烧结份额	炼焦份额	炼铁份额	炼钢份额	铸钢份额	热轧份额	计算值	计算值
$E_e$ (kgce/t 钢)	32.00	12.04	10.31	4.54	4.29	16.36	79.54	168.42
$E_h$ (kgce/t 钢)	75.07	533.1	572.2	4.94	0.12	29.05	1 214.51	5.79
$E_t$ (kgce/t 钢)	107.07	545.15	582.53	9.48	4.41	45.41	1 294.05	174.21
$M_t$ (t/t 钢)	1.96		25	155.10	11.40	15.10	208.6	1.31
$D_{TSP}$ (g/t 钢)	291.48	39	233.01	82.90	-	1.68	648.08	67

注:钢铁厂燃料低热值按无烟煤 30.46 MJ/kg、洗精煤 26.38 MJ/kg、焦粉 29.57 MJ/kg、焦炭 30.52 MJ/kg、焦炉煤气 16.8 MJ/m<sup>3</sup>、高炉煤气 3.55 MJ/m<sup>3</sup>、转炉煤气 7.7 MJ/m<sup>3</sup>、天然气 36 MJ/m<sup>3</sup> 计算.



118. 20 g/t 焦,主要原因是燃料能消耗量大. 同时也注意到,烧结和炼铁工序的烟粉尘排放量最高却不是燃料能消耗最大的工序,这主要与工序排放的烟粉尘粒度分布及除尘效率有关.

研究表明<sup>[11-12]</sup>烧结机头、高炉出铁场及焦炉出焦时 PM<sub>10</sub>/TSP 的值分别为 99.4%,50.8%,8%. 因此工序吨产品烟粉尘排放量指标同时受资源能源消耗量、颗粒物粒度分布及除尘效率的影响.

表 4 某钢铁企业生产流程物质代谢分析(工序层面)  
Table 4 Material metabolism analysis of the iron and steel enterprise production (process level)

分析指标	烧结 工序	炼焦 工序	炼铁 工序	炼钢 工序	铸钢 工序	热轧 工序
$E_e$	24.42	36.48	10.85	4.54	4.29	16.36
$E_h$	57.31	1615.45	602.32	4.94	0.12	29.05
$E_t$	81.73	1652.00	613.20	9.48	4.41	45.21
$M_t$	1.50		26.32	155.10	11.40	15.10
$D_{TSP}$	222.50	118.20	245.27	82.90	—	1.68

注:为便于比较  $E_e, E_h, E_t$  单位均换算为 kgce/t 产品;  $M_t$  单位为 t/t 产品;  $D_{TSP}$  单位为 g/t 产品.

3 结果讨论

1) 没有过量的消耗就没有多余的排放. 钢铁工业应调整能源结构,从源头控制污染物的排放,将资源能源的高效利用和污染物减排工作重点放在烧结和炼铁工序.

2) 从环境污染和清洁生产的角度,电炉短流程可以在一定程度上解决钢铁行业的污染物排放问题,因此钢铁企业需考虑如何将高炉-转炉长流程和电炉短流程有效地结合,调整生产流程结构以减少环境压力.

3) 工序吨产品烟粉尘排放量指标同时受资源能源消耗量、颗粒物粒度分布及除尘效率的影响. 钢铁工业应加强对于细颗粒物的控制研究和实践.

4 结 语

本文采用物质流分析法定量分析了典型钢铁企业资源能源利用及烟粉尘排放情况,根据计算结果和分析提出了企业节能减排和产业结构调整的方向性建议,从而促进钢铁企业减少环境压力,实现可持续发展.

参考文献:

[1] Hu D, Guo Z, Wang Z, et al. Metabolism analysis and eco-environmental impact assessment of two typical cement production systems in Chinese enterprises [J]. *Ecological Informatics*, 2014, 26(3): 70-77.

[2] Dorota B K. Life cycle assessment of steel production in Poland; a case study [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2013, 54(17): 235-243.

[3] Silvana K, Chaoying Z, Vito A, et al. Energy use in two Italian and Chinese tile manufacturers; a comparison using an enterprise input-output model [J]. *Energy*, 2010, 35(1): 364-374.

[4] Li T, Liu Z C, Zhang H C, et al. Environmental emissions and energy consumptions assessment of a diesel engine from the life cycle perspective [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2013, 53(16): 7-12.

[5] Rynkiewicz C. The climate change challenge and transitions for radical changes in the European steel industry [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2007, 16(17): 781-789.

[6] Rainer R, Miguel A A M, Serge R, et al. Best available techniques (BAT) reference document for iron and steel production [R]. Seville: Publications Office of the European Union, 2013.

[7] Xue H, Kumar V, Sutherland J W. Material flows and environmental impacts of manufacturing systems via aggregated input-output models [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2007, 15(1): 1349-1358.

[8] 陆钟武. 以控制资源消耗量为突破口做好环境保护规划 [J]. *环境科学研究*, 2005, 18(6): 1-6.  
(Lu Zhong-wu. Striving for better environmental protection plan by controlling resource use as its breach [J]. *Research of Environmental Sciences*, 2005, 18(6): 1-6.)

[9] Nicolás P, Fosé A M. Prospective scenarios on energy efficiency and CO<sub>2</sub> emissions in the European iron & steel industry [J]. *Energy*, 2013, 54(9): 113-128.

[10] 高磊, 任南琪, 陈兆波, 等. 典型玉米深加工企业物能消耗与环境排放分析 [J]. *哈尔滨工业大学学报*, 2012, 44(2): 61-65.  
(Gao Lei, Ren Nan-qi, Chen Zhao-bo, et al. Energy consumption and environment emissions analysis of a typical corn deep processing enterprise [J]. *Journal of Harbin Institute of Technology*, 2012, 44(2): 61-65.)

[11] 马京华. 钢铁企业典型生产工艺颗粒物排放特征研究 [D]. 重庆: 西南大学, 2009.  
(Ma Jing-hua. Emission characteristics of particulates from typical production process of iron and steel enterprises [D]. Chongqing: Southwest University, 2009.)

[12] 李从庆. 炼焦生产大气污染物排放特征研究 [D]. 重庆: 西南大学, 2009.  
(Li Cong-qing. Characterization of air pollutants emitted from coking production [D]. Chongqing: Southwest University, 2009.)