

基于投入产出模型的生产流程能耗敏感性分析

廖胜明, 刘骁浚, 饶政华

(中南大学 能源科学与工程学院, 湖南 长沙 410083)

摘要: 通过纳入副产品流向和流量,使拓展后的企业投入产出模型能够更全面地反映生产流程中各种物质流和能流的相互作用,也能更准确地求出各产品的能值和总能耗。在此基础上,结合敏感性分析,建立了最终需求量和系数两类因素变化对总能耗影响的数学关系,从而找到工业生产流程中影响能耗最关键的因素。计算分析湘钢的产品能值和总能耗结果表明:总能耗的 90% 以上来源于化石燃料,而不足 10% 来源于外购物料的上游能耗;副产品回收利用能减少 62.5% 的总能耗;焦炉对洗精煤的单耗、高炉焦比、1# 转炉的铁水单耗、含铁物流的利用效率和高炉的技术优化(烧结矿单耗和煤气产率)对能耗影响最为显著。

关键词: 投入产出模型; 敏感性分析; 能耗; 生产流程; 钢铁生产流程

中图分类号: TK01+8; X196

文献标志码: A

Sensitivity Analysis of Energy Consumption in Industrial Production Processes Based on Input-output Model

LIAO Shengming, LIU Xiaojun, RAO Zhenghua

(School of Energy Science and Engineering, Central South University, Changsha 410083, China)

Abstract: By adding the production, usage, export and loss of by-products flows, an improved enterprise input-output model was proposed first, which could fully reflect the interactions of material and energy flows and more accurately calculate the products' embodied energy and total energy consumption. Then, the sensitivity analysis based on the developed input-output model was established to calculate the influences of final demand and technical coefficients on the total energy consumption. It helps to identify the key coefficients on the energy consumption. The products' embodied energy and total energy consumption of Xiangtan Steel Plant was obtained and analyzed. The results show that more than 90% of the total energy consumption is from fossil

fuel while the upstream energy consumption of the purchased raw materials contributes to less than 10%; the by-products utilizations could reduce the total energy consumption by 62.5%; the specific consumption of the washed coal in coke oven, the coke ratio of blast furnace (BF), the specific consumption of hot metal in 1# basic oxygen furnace, the yield rate of iron-containing products and the technology improvement of BF (e.g. specific consumption of sinter and gas production rate) are the most important coefficients for the change of energy consumption.

Key words: input-output model; sensitivity analysis; energy consumption; production processes; steel-making processes

降低工业流程的能耗和物耗一直以来都是企业能源管理者的目标。如何计算产品的能值和生产的总能耗? 如何找出影响能耗的关键因素? 通过将企业投入产出表与敏感性分析法相结合,能够解决以上两个在能源管理中最常见的问题,为企业节能降耗提供决策依据。

企业投入产出模型是建立在大量实际生产统计数据的基础上,以确切的数量关系反应企业内部各流程单元、各产品之间的物流供应关系和生产联系,因此,可以全面反应各种产品包括中间产品的流向和流量。Lin 和 Polenskes^[1]设计了最初的企业级投入产出模型,随后 Polenske 和 McMichael^[2]改进了 Lin 的模型,并应用于计量和分析一家焦炭厂的物耗和能耗以及不同生产技术的效益。Albino 等^[3]针对供应链管理也提出了投入产出模型计量和分析生产系统的物流和能流,广泛应用于地区的供应链^[4]、工业园区^[5]、陶瓷制造厂^[6-7]等。在国内学者中,陆钟武^[8]团队提出的能值投入产出模型应用最广泛。近几年来,企业级投入产出模型和相关应用不断发展,比如多级投入产出^[9],三维模型^[10],与工业共生分析

收稿日期: 2016-07-06

基金项目: 湖南省科技计划重点项目(2012GK2025);中南大学博士生自主探索创新项目(2013ZZTS039)

第一作者: 廖胜明(1963—),男,教授,博士生导师,工学博士,主要研究方向为工业系统节能和能源系统分析。

E-mail: smliao@csu.edu.cn

相结合^[11]等。

敏感性分析属于事前分析,即通过分析某一时间内特定一组的投入产出系数和最终产量变化对研究目标(如能耗或碳排放等)的影响,发现接下来一段时间影响目标值的关键因素,为制定相关政策、措施和方案提供理论参考。敏感性分析分两类:一类是研究技术系数不变前提下,产品最终产量变化对能耗或碳排放的影响^[12-13];另一类则是研究投入产出系数变化对能耗的影响^[14-18]。上述研究的对象都是针对国家或地区,几乎没有针对工业流程的敏感性分析。本文通过拓展原有的企业投入产出模型,将副产品流向和流量纳入模型,从而能更加全面地反映流程中各种物质流的相互作用,也能更加准确求出各产品能值和总能耗;在此基础上,将企业级投入产出能耗模型和敏感性分析相结合,并就最终需求量和和技术系数两类因素变化对能耗的影响都进行了系统分析。

1 方法

1.1 企业级投入产出模型

假设每个流程单元只生产一种或者一类主产品。假设整个生产流程一共有 n 个流程单元(相对应的有 n 种主产品),一共需要消耗 s 种不同的外购原料,一共生产 v 种副产品。投入产出表的结构如表 1 所示,其中 $\mathbf{A}=[A_{ij}]$,为自产主产品的直接消耗系数矩阵($n \times n$), A_{ij} 表示流程单元 j 每单位主产品需消耗自产主产品 i 的数量; $\mathbf{D}=[D_{kj}]$,为外购产品(原材料,能源)的直接消耗系数矩阵($s \times n$), D_{kj} 表示流程单元 j 每单位主产品需消耗外购产品 k 的数量; $\mathbf{R}=[R_{fj}]$,为副产品直接产出系数矩阵($v \times n$), R_{fj} 表示流程单元 j 每单位主产品所附带生产副产品 f 的数量; $\mathbf{O}=[O_{gj}]$,为自产主产品对副产品的直接消耗系数矩阵($v \times n$), O_{gj} 表示流程单元 j 每单位主产品需消耗副产品 g 的数量; $\mathbf{W}=[W_{hj}]$,为副产品的直接损失系数矩阵($v \times n$), W_{hj} 表示流程单元 j 每单位主产品所损失掉的副产品 h 的数量; $\mathbf{X}=[X_i]$,为主产品的总数量列向量($n \times 1$); $\mathbf{Y}=[Y_i]$,为主产品的最终数量列向量($n \times 1$); $\mathbf{X}^D=[X_k^D]$,为外购产品数量的列向量($s \times 1$); $\mathbf{X}^R=[X_f^R]$,为副产品总的生产数量列向量($v \times 1$); $\mathbf{X}^O=[X_g^O]$,为副产品总的利用数量列向量($v \times 1$); $\mathbf{Y}^O=[Y_g^O]$,为副产品最终利用数量列向量($v \times 1$); $\mathbf{X}^W=[X_h^W]$,为副产品未被利用数量列向量($v \times 1$); $\mathbf{e}=[e_i]$,为自产主产品能

值的列向量($n \times 1$); $\mathbf{Q}=[Q_k]$,为外购产品的热值或者能值的列向量($s \times 1$); $\mathbf{C}=[C_g]$,为副产品的热值或者能值列向量($v \times 1$)。

表 1 生产流程能源投入产出

Tab. 1 The conceptual energy input-output of production processes

投入产出	流程单元		能值或热值	最终产品	总量
	1	...n			
自产主产品投入	1...n	\mathbf{A}	\mathbf{e}	\mathbf{Y}	\mathbf{X}
外购产品投入	1...s	\mathbf{D}	\mathbf{Q}		\mathbf{X}^D
副产品产出	1...v	\mathbf{R}	\mathbf{C}		\mathbf{X}^R
副产品投入	1...v	\mathbf{O}	\mathbf{C}	\mathbf{Y}^O	\mathbf{X}^O
未回收副产品(废物)	1...v	\mathbf{W}	\mathbf{C}		\mathbf{X}^W

根据主产品的数量平衡关系可得

$$\mathbf{AX} + \mathbf{Y} = \mathbf{X} \quad (1)$$

$$\mathbf{X} = (\mathbf{I} - \mathbf{A})^{-1} \mathbf{Y} \quad (2)$$

根据外购产品的数量平衡关系可得

$$\mathbf{X}^D = \mathbf{DX} \quad (3)$$

根据副产品生产的数量平衡关系可得

$$\mathbf{X}^R = \mathbf{RX} \quad (4)$$

根据副产品利用的数量平衡关系可得

$$\mathbf{X}^O = \mathbf{OX} + \mathbf{Y}^O \quad (5)$$

根据副产品废弃的数量平衡关系可得

$$\mathbf{X}^W = \mathbf{WX} \quad (6)$$

根据副产品生产、利用和废弃的数量平衡关系可得

$$\mathbf{X}^W + \mathbf{X}^O = \mathbf{X}^R \quad (7)$$

流程单元的直接能耗为

$$e^p = \mathbf{Q}^T \mathbf{D} - \mathbf{C}^T (\mathbf{R} - \mathbf{W} - \mathbf{O}) \quad (8)$$

主产品的能值等于生产单位主产品所消耗的各种物料,能源的载能量之和减去其伴随生产的副产品的载能量,即

$$e_j = \sum_{i=1}^n A_{ij} e_i + \sum_{i=1}^s D_{ij} Q_i - \sum_{i=1}^v (R_{ij} - O_{ij} - W_{ij}) C_i \quad (9)$$

求解后化为矩阵形式

$$\mathbf{e} = [(\mathbf{I} - \mathbf{A})^{-1}]^T [\mathbf{D}^T \mathbf{Q} - (\mathbf{R}^T - \mathbf{O}^T - \mathbf{W}^T) \mathbf{C}] \quad (10)$$

整个工业流程的总能耗为

$$\mathbf{E} = \mathbf{e}^p \mathbf{L} \mathbf{Y} = \mathbf{e}^T \mathbf{Y} \quad (11)$$

其中 $\mathbf{L} = (\mathbf{I} - \mathbf{A})^{-1}$ 为列昂惕夫逆矩阵。为了便于接下来的敏感性分析,现将式(11)转换如下:

$$\mathbf{E} = \sum_{\beta=1}^n e_{\beta}^p \sum_{\theta=1}^n L_{\beta\theta} Y_{\theta} = \sum_{i=1}^n e_i Y_i \quad (12)$$

1.2 能耗敏感性分析

由企业投入产出模型可知,整个工业流程的总能耗受主产品能值和主产品最终需求的影响,主产

品的能值受工业流程中各类直接投入产出系数的影响. 研究应用敏感性分析, 定量分析影响因素变化对总能耗的影响大小, 并找出影响能耗的关键因素, 从而为制定能源管理和节能整改方案提供理论依据. 通常, 影响力的大小可以借助该因素的弹性系数来衡量, 总能耗对该因素的弹性系数越大, 说明其越重要、越关键, 反之亦然. 影响总能耗的因素分为两类: ①主产品的最终需求量(Y); ②整个生产系统的技术系数(A, D, R, O, W, Q 和 C).

首先, 主产品最终需求变化对总能耗的影响为

$$\Delta E = \sum_{i=1}^n e_i \Delta Y_i \quad (13)$$

因此, 总能耗对主产品最终需求 Y_i 的弹性系数为

$$\varepsilon_{E, Y_i} = \frac{e_i Y_i}{E} \quad (14)$$

自产主产品的直接消耗系数变化会引起列昂惕夫逆矩阵变化, 进而导致总能耗的变化. 根据 Sherman-Morrison 公式, 可得第 i 行第 j 列的主产品直接消耗系数 (A_{ij}) 对列昂惕夫逆矩阵系数 $L_{\beta\theta}$ 的影响为

$$\Delta L_{\beta\theta} = \frac{L_{\beta i} L_{\theta j} \Delta A_{ij}}{1 - L_{ji} \Delta A_{ij}} \quad (15)$$

因此, 将式(15)代入式(12)可得到总能耗的变化为

$$\Delta E = \sum_{\beta=1}^n e_{\beta}^i \sum_{\theta=1}^n \frac{L_{\beta i} L_{\theta j} \Delta A_{ij}}{1 - L_{ji} \Delta A_{ij}} Y_{\theta} \quad (16)$$

因为 $\sum_{\theta=1}^n L_{\theta j} Y_{\theta} = X_j$ 和 $\sum_{\beta=1}^n e_{\beta}^i L_{\beta i} = e_i$, 所以式(16)可简化为

$$\Delta E = \frac{e_i X_j \Delta A_{ij}}{1 - L_{ji} \Delta A_{ij}} \quad (17)$$

因此, 总能耗对 A_{ij} 的弹性系数为

$$\varepsilon_{E, A_{ij}} = \frac{\frac{\Delta E}{E}}{\frac{\Delta A_{ij}}{A_{ij}}} = \frac{e_i X_j A_{ij}}{(1 - L_{ji} \Delta A_{ij}) E} \quad (18)$$

自产主产品对外购产品的直接消耗系数 D_{kj} 变化引起的总能耗变化为

$$\Delta E = Q_k \Delta D_{kj} X_j \quad (19)$$

因此总能耗对 D_{kj} 的弹性系数为

$$\varepsilon_{E, D_{kj}} = \frac{\frac{\Delta E}{E}}{\frac{\Delta D_{kj}}{D_{kj}}} = \frac{Q_k X_j D_{kj}}{E} \quad (20)$$

副产品直接生产系数 R_{fj} 变化引起的总能耗变化为

$$\Delta E = -C_f \Delta R_{fj} X_j \quad (21)$$

因此总能耗对 R_{fj} 的弹性系数为

$$\varepsilon_{E, R_{fj}} = \frac{\frac{\Delta E}{E}}{\frac{\Delta R_{fj}}{R_{fj}}} = -\frac{C_f X_j R_{fj}}{E} \quad (22)$$

自产主产品对副产品的直接消耗系数 O_{gj} 变化引起的总能耗变化为

$$\Delta E = C_g \Delta O_{gj} X_j \quad (23)$$

因此, 总能耗对 O_{gj} 的弹性系数为

$$\varepsilon_{E, O_{gj}} = \frac{\frac{\Delta E}{E}}{\frac{\Delta O_{gj}}{O_{gj}}} = \frac{C_g X_j O_{gj}}{E} \quad (24)$$

副产品的直接损失系数 W_{hj} 变化引起的总能耗变化为

$$\Delta E = C_h \Delta W_{hj} X_j \quad (25)$$

因此, 总能耗对 W_{hj} 的弹性系数为

$$\varepsilon_{E, W_{hj}} = \frac{\frac{\Delta E}{E}}{\frac{\Delta W_{hj}}{W_{hj}}} = \frac{C_h X_j W_{hj}}{E} \quad (26)$$

外购产品的热值或者能值 Q_k 变化引起的总能耗变化为

$$\Delta E = \Delta Q_k \sum_{j=1}^n D_{kj} X_j = \Delta Q_k X_k^D \quad (27)$$

因此, 总能耗对 Q_k 的弹性系数为

$$\varepsilon_{E, Q_k} = \frac{\frac{\Delta E}{E}}{\frac{\Delta Q_k}{Q_k}} = \frac{X_k^D Q_k}{E} \quad (28)$$

副产品热值或者能值 C_f 变化引起的总能耗变化为

$$\Delta E = -\Delta C_f \sum_{j=1}^n (R_{fj} - O_{gj} - W_{hj}) X_j = -\Delta C_f Y_f^Q \quad (29)$$

因此, 总能耗对 C_f 的弹性系数为

$$\varepsilon_{E, C_f} = \frac{\frac{\Delta E}{E}}{\frac{\Delta C_f}{C_f}} = -\frac{Y_f^Q C_f}{E} \quad (30)$$

由式(15)~式(30)可知, 作为技术相关系数的弹性系数实质上受两部分因素影响: 一是整个工业生产系统的生产技术系数; 另一部分则与主产品的最终需求的结构相关. 为了能够孤立地分析技术相关系数变化对能耗的影响, 而不考虑主产品最终需求, 按照 Taroncon^[14] 建议, 假定所有最终产品需求为 1 ($Y_i = 1 \forall i$), 即可得到不受主产品最终需求影响的弹性系数. 以最复杂的自产主产品的直接消耗系数为例, 其不受主产品最终需求影响的弹性系数由式(31)可得, 其他技术相关系数不受主产品最终需求影响的弹性系数的求法同理可得

$$\varepsilon_{E, A_{ij}}^* = \frac{e_i \sum_{\theta=1}^n L_{\theta j} A_{ij}}{(1 - L_{ji} \Delta A_{ij}) \sum_{i=1}^n e_i} \quad (31)$$

2 实例分析:钢铁厂

2.1 湘钢

湖南华菱湘潭钢铁有限公司(以下简称湘钢),是国内现代化大型钢铁联合企业,地处湖南省中部,具备年产钢 1 000 万 t 的综合生产能力,资产总额近 500 亿元,在岗职工 1.58 万人.湘钢的生产工艺是高炉-转炉“长流程”,整个钢铁厂包括以下流程单位:铁矿烧结厂、焦化厂、炼铁厂(包括四座高炉)、三座

氧气转炉(BOF)、三个连续铸造厂、两个棒材厂、三个线材厂、两个厚板厂、蒸汽厂、发电厂、鼓风机厂、自来水厂、空气压缩站和混气站.流程如图 1 所示.

2.2 总能耗计算的范围

钢铁生产过程中,钢厂需要从外购入原材料(物料和能源),同时也会对外输出一些副产品.根据系统节能的思想,钢厂的总能耗计算的边界不仅需要包含现场的能源的消耗,也要考虑其他非能源的原料在上游生产过程中所消耗的能量(比如外购的球团矿在其他地方生产时所消耗的能量).

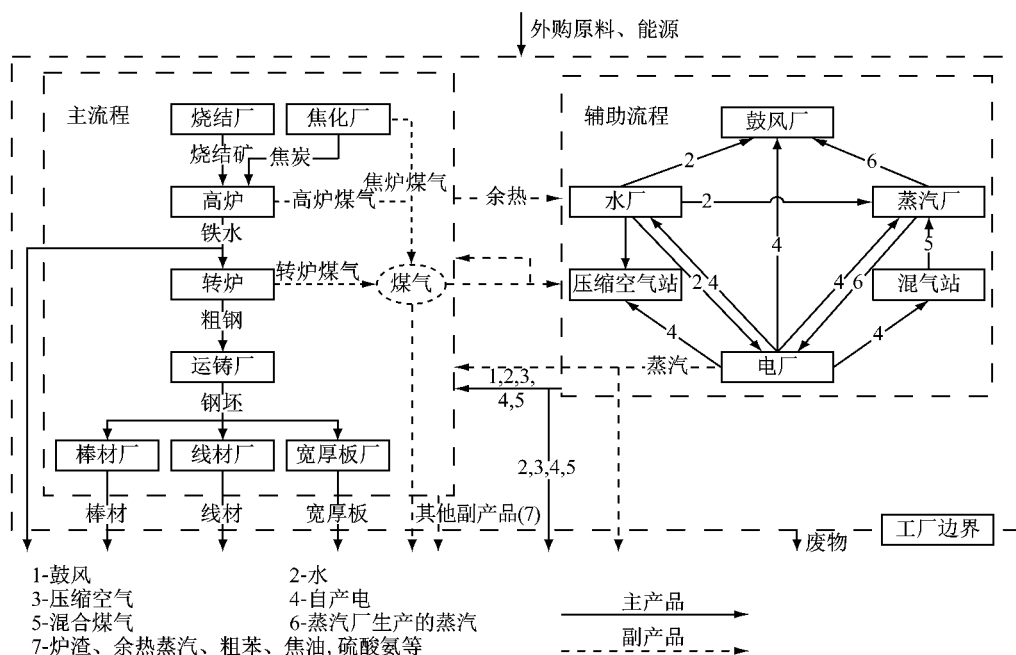


图 1 湘潭钢铁厂长流程工艺流程图

Fig.1 Xiangtan integrated steel-making processes

2.3 数据来源

研究需要两类数据:各流程单元的物质流和能量流数据;外购产品和副产品的热值和能值.综合权衡数据的来源质量、一致性、准确性和时间有效性^[19]后,钢铁流程的物质流和能量流的数据来源于钢铁厂 2013 年度的各类技术报表和统计数据.能值数据来源于世界钢铁协会推荐的能值数据^[20]、中国本土的生命周期数据库^[21]和一些相关学术文献^[22-25].

3 结果与分析

3.1 2013 年湘钢的主产品能值和总能耗状况

根据式(10)可以计算得到 2013 年湘钢主产品能值,见表 2.各类钢材能值平均为 $21.2 \text{ MJ} \cdot \text{kg}^{-1}$,其中以 5 m 宽厚板材能值最高为 $21.8 \text{ MJ} \cdot \text{kg}^{-1}$.转炉钢能值比铁水能值低,说明湘钢转炉炼钢流程

中消耗的能量小于回收的能量,已经实现负能炼钢.根据式(11)可计算得到 2013 年的钢厂的总能耗为 145.39 PJ,其中超过 90%来源于外购的洗精煤、焦炭和无烟煤这三类化石燃料.铁矿石、石灰石,外购铁皮等原材料的上游能耗占钢厂总能耗的比列很低,不到 10%,这反映了钢铁制造流程现场的能耗占绝对比例,而消耗的物料所隐含的能耗占比较小.副产品不仅有一定的经济价值,而且也能够大大降低钢厂的总能耗.2013 年湘钢的副产品的回收利用一共减少了 62.5%的总能耗,其中煤气、余热蒸汽和高炉渣的回收利用更是起到了最主要的节能作用.

3.2 各类因素对总能耗的影响

所构建的企业级投入产出模型包含 21 个流程单元及其主产品、14 种不同的外购产品、15 种不同的副产品、共含有 256 个非零的元素.其中任何一个非零元素的变化都会引起钢厂总能耗的变化.根据

表 2 湘钢 2013 年自产产品的能值

Tab.2 The embodied energy of Xiangtan Steel Plant's main products in 2013

流程单元名称	编号	主产品	能值
焦炉	1	焦炭/MJ·kg ⁻¹	32.1
烧结厂	2	烧结矿/MJ·kg ⁻¹	2.8
高炉	3	铁水/MJ·kg ⁻¹	17.3
转炉 1	4	转炉钢 1/MJ·kg ⁻¹	16.8
连铸 1	5	连铸钢坯 1/MJ·kg ⁻¹	18.3
线材厂 1	6	线材 1/MJ·kg ⁻¹	21.4
线材厂 2	7	线材 2/MJ·kg ⁻¹	20.9
棒材厂 1	8	棒材 1/MJ·kg ⁻¹	20.8
棒材厂 2	9	棒材 2/MJ·kg ⁻¹	21.0
线材厂 3	10	线材 3/MJ·kg ⁻¹	21.0
转炉 2	11	转炉钢 2/MJ·kg ⁻¹	16.3
连铸 2	12	连铸钢坯 2/MJ·kg ⁻¹	17.4
3.8 m 宽厚板厂	13	3.8 m 宽厚板/MJ·kg ⁻¹	21.5
连铸 3	14	连铸钢坯 3/MJ·kg ⁻¹	17.3
5 m 宽厚板厂	15	5 m 宽厚板/MJ·kg ⁻¹	21.8
电厂	16	自产电/MJ·kWh ⁻¹	12.4
鼓风机厂	17	鼓风/MJ·m ⁻³	1.3
蒸汽锅炉厂	18	蒸汽锅炉蒸汽/MJ·MJ ⁻¹	1.4
水厂	19	工业用水/MJ·kg ⁻¹	0.009
空气压缩站	20	压缩空气/MJ·m ⁻³	1.1
混气站	21	混合煤气/MJ·m ⁻³	11.3

2.2 节所提出的公式,假定所有非零元素变化 1%,可以求出总能耗对不同因素所含非零元素的弹性系数.通过对求出的 256 个弹性系数进行排序,选出影响力前 10%(即前 25 名)的关键元素,如表 3 所示.在 25 个关键元素中,主产品直接消耗系数占接近一半(12 个),主要集中在对一些高能值主产品的直接消耗系数上.这些关键的主产品直接消耗系数大体上可以分为两类.一类是烧结厂和高炉它们对焦炭和烧结矿的单耗.另一类主要是集中在各个不同的转炉、连铸和热轧钢流程单元的对含铁物料的利用率上,即成材率的水平上.这其中以 1 号转炉和 1 号连铸厂的成材率最为关键,这是因为它们的产量最大的缘故.5 m 宽厚板、3.8 m 宽厚板、棒材 2 和线材 2 的最终产品需求对总能耗的影响大,这主要是因为这四类产品 2013 年的最终产品需求量排名靠前的原因.

外购产品消耗系数中,影响最大的三个系数都集中在焦炉和高炉对化石燃料的需求上.这是因为洗精煤、无烟煤和外购焦炭这三类化石燃料基本上占湘钢总能耗的 90%以上,导致它们的变化对总能耗有显著影响.降低它们的单耗,特别是焦炉中洗精

表 3 影响湘钢能耗前 25 的关键元素(2013 年为基准)

Tab.3 The top 25 most influential coefficients about the total energy consumption of Xiangtan Steel Plant (based on Year of 2013)

元素	含义	弹性系数
Q ₉	外购洗精煤的能值	0.614
D ₉₁	焦炉对外购洗精煤的直接消耗系数	0.614
A ₁₃	高炉对焦炭的直接消耗系数	0.408
A ₄₅	1 号连铸厂对 1 号转炉钢的直接消耗系数	0.368
A ₃₄	1 号转炉对铁水的直接消耗系数	0.346
Y ₁₅	5 m 宽厚板的最终需求量	0.260
A _{14,15}	5 m 宽厚板厂对 3 号连铸厂钢坯的直接消耗系数	0.224
A _{11,12}	2 号连铸厂对 2 号转炉钢的直接消耗系数	0.222
A _{3,11}	2 号转炉对铁水的直接消耗系数	0.217
A _{3,14}	3 号转炉对铁水的直接消耗系数	0.214
Y ₁₃	3.8 m 宽厚板的最终需求量	0.213
A _{12,13}	3.8 m 宽厚板厂对 2 号连铸厂钢坯的直接消耗系数	0.189
Q ₁₁	外购焦炭的能值	0.183
D _{11,3}	高炉对外购焦炭的直接消耗系数	0.183
A ₂₃	高炉对烧结矿的直接消耗系数	0.164
Y ₇	线材 2 的最终需求量	0.142
Q ₁₀	外购无烟煤的能值	0.142
D _{10,3}	高炉对外购无烟煤的直接消耗系数	0.138
A ₅₇	2 号线材厂对 1 号连铸厂钢坯直接消耗系数	0.126
Y ₉	棒材 2 的最终需求量	0.115
A ₅₉	2 号棒材厂对 1 号连铸厂钢坯直接消耗系数	0.104
A ₁₂	烧结厂对焦炭的直接消耗系数	0.104
O ₂₃	高炉对高炉煤气直接消耗系数	0.102
R ₁₁	焦炉煤气的直接产出系数	-0.120
R ₂₃	高炉煤气的直接产出系数	-0.292

煤的单耗是今后节能的重点方向.与此相对应的,这三类化石燃料的热值或者能值也对总能耗影响较大.但是这些燃料的低位热值并不能改变,而能值的大小取决于它们各自工业用能水平,属于外界因素.这其中影响力排名并列第一的是焦炉对外购洗精煤的直接消耗系数以及外购洗精煤的能值.这是因为洗精煤是湘钢 2013 年最主要的能源消耗品种,而且全部是用于焦炉制造焦炭,故而弹性系数一样.同样的道理,弹性系数一样的还有外购焦炭的能值和高炉对外购焦炭的直接消耗系数.

副产品的生产利用环节中,提高高炉煤气和焦炉煤气的单位产率能显著降低总能耗,而降低煤气放散率,在同样的 1%变化的前提下,对总能耗的变化小.这是因为湘钢在 2013 年各类煤气的放散率已经很小,在这个基础再降低原本放散率的 1%已经不能显著降低总能耗.副产品的内部利用中,高炉对自

己所产的高炉煤气的单耗对总能耗有较大影响。

以上结果是基于 2013 年湘钢主产品最终产品需求的数量而言,如果主产品的最终需求量发生变化,则以上弹性系数的值也会发生变化.为了能够只反映湘钢生产中的技术相关系数对能耗影响的强弱,可以采用如式(31)计算各个因素不考虑主产品最终需求的弹性系数.同样假定所有技术系数变化 1%,影响力前 25 的技术系数如表 4 所示.总体而言,表 3 中大部分影响力较强系数也出现在表 4,只是具体的数值不一样.这主要受主产品最终需求影响.比如表 4 中四个不同的线材和棒材厂的弹性系数差不多,表示对总能耗影响强弱程度相近,但是 1 号线材厂和 1 号棒材厂却并没有出现在表 3.这是因为 1 号线材厂和 1 号棒材厂的最终产量不及 2 号棒材厂和线材厂所导致.

为了能够更加清楚地表现湘钢 2013 年的关键技术系数和相关联的流程、产品、原料关系,结合表 4 的结果将它们绘制于图 2.由图 2 可见,几乎所有含铁物流的直接消耗系数都对能耗的变化起着关键作用.因此在钢铁制造流程中节能的关键不仅要降低化石燃料的直接消耗,也要着重改善含铁物流的利用效率,提高各环节的金属收得率.此外,一共有 7 股物质流和能流的利用或产出的效率和高炉直接相关,4 股物质流和能流在其它流程单元的利用系数与高炉间接相关,数量远远超过其它流程单元.由此可见高炉的技术优化,特别是与这 7 类直接相关的物质流、能流的技术优化对整个钢铁流程的节能有显著效果.

表 4 影响湘钢能耗前 25 的不考虑主产品最终需求的关键技术相关系数(2013 年为基准)

Tab.4 Top 25 most influential technological relevance of technical coefficients regarding total energy consumption of Xiangtan steel plant (Based on Year of 2013)

元素	含义	弹性系数 (不考虑 最终需求)
D_{91}	焦炉对外购洗精煤的直接消耗系数	0.745
Q_9	外购洗精煤的能值	0.745
A_{13}	高炉对焦炭的直接消耗系数	0.401
A_{34}	1 号转炉对铁水的直接消耗系数	0.378
A_{45}	1 号连铸厂对 1 号转炉钢的直接消耗系数	0.343
$A_{3,11}$	2 号转炉对铁水的直接消耗系数	0.206
Q_{11}	外购焦炭的能值	0.180
$D_{11,3}$	高炉对外购焦炭的直接消耗系数	0.180
A_{23}	高炉对烧结矿的直接消耗系数	0.161
$A_{11,12}$	2 号连铸厂对 2 号转炉钢的直接消耗系数	0.155
Q_{10}	外购无烟煤的能值	0.139
$D_{10,3}$	高炉对外购无烟煤的直接消耗系数	0.135
$A_{3,14}$	3 号转炉对铁水的直接消耗系数	0.120
A_{12}	烧结厂对焦炭的直接消耗系数	0.108
O_{23}	高炉对高炉煤气的直接消耗系数	0.102
$O_{2,18}$	蒸汽厂对高炉煤气的直接消耗系数	0.095
$A_{12,13}$	3.8 m 宽厚板厂对 2 号连铸厂钢坯直接消耗系数	0.067
A_{59}	2 号棒材厂对 1 号连铸厂钢坯直接消耗系数	0.066
$A_{17,3}$	高炉对鼓风直接消耗系数	0.066
A_{58}	1 号棒材厂对 1 号连铸厂钢坯直接消耗系数	0.066
$A_{14,15}$	5 m 宽厚板厂对 3 号连铸厂钢坯直接消耗系数	0.065
A_{56}	1 号线材厂对 1 号连铸厂钢坯直接消耗系数	0.065
A_{57}	2 号线材厂对 1 号连铸厂钢坯直接消耗系数	0.065
R_{11}	焦炉煤气直接产出系数	-0.145
R_{23}	高炉煤气直接产出系数	-0.287

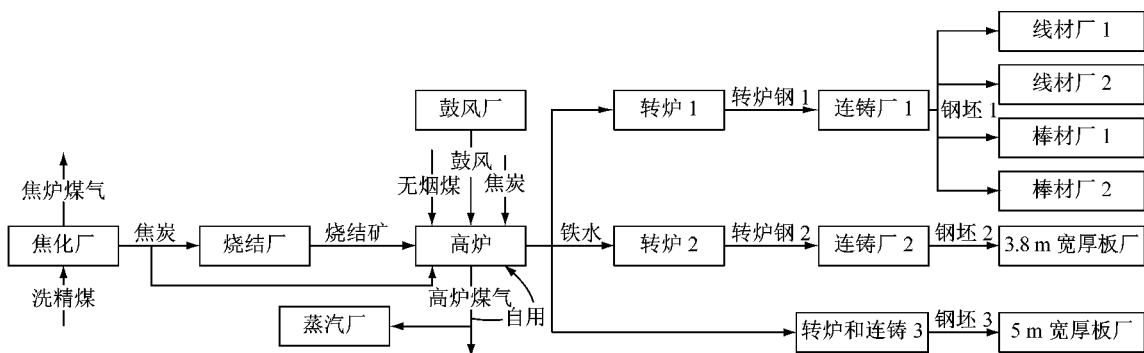


图 2 影响湘钢总能耗的关键技术系数对应的流程图

Fig.2 Key coefficients and flows about the total energy consumption of Xiangtan Steel Plant (Based on Year of 2013)

4 结论

针对工业流程,首先建立了基于主产品,副产品,

外购产品物质流和能源流平衡的流程级投入产出模型,既能够全面计算分析物质流和能流的大小,也能计算工业流程中主产品的能值和流程总能耗.然后,结合敏感性分析法建立了工业流程中不同物质流和

能源流直接消耗和产出系数变化对总能耗大小影响的数学关系,从而帮助分析和找到对能耗影响最为关键的元素。

以湘钢2013年生产数据为例,计算表明湘钢总能耗90%以上来源于外购的化石燃料而外购物料的上游能耗不足10%;副产品能够大大降低钢厂的总能耗,回收利用一共减少了62.5%的总能耗;焦炉对外购洗精煤的单耗、高炉焦比和1号转炉的铁水单耗是对能耗影响最显著的三个要素;高炉的技术优化在所有流程单元中最为关键,特别是焦比,烧结矿单耗和煤气产率这三类技术指标的改善;含铁物流的利用效率,提高各环节的金属收得率对能耗的变化起着关键作用。

参考文献:

- [1] Lin X, Polenske K R. Input-output modeling of production processes for business management [J]. *Structural Change and Economic Dynamics*, 1998, 9(2): 205.
- [2] Polenske K R, Mcmichael F C. A Chinese cokemaking process-flow model for energy and environmental analyses [J]. *Energy Policy*, 2002, 30: 865.
- [3] Albino V, Dietzenbacher E, Kühtz S. Analysing materials and energy flows in an industrial district using an enterprise input-output model [J]. *Economic Systems Research*, 2003, 15(4): 457.
- [4] Albino V, Izzo C, Kühtz S. Input-output models for the analysis of a local/global supply chain [J]. *International Journal of Production Economics*, 2002, 78(2): 119.
- [5] Albino V, Kühtz S. Assessment of environmental impact of production processes in industrial districts using input-output modeling techniques [J]. *Journal of Environmental Informatics*, 2003, 1(1): 7.
- [6] Albino V, Kühtz S. Enterprise input-output model for local sustainable development—the case of a tiles manufacturer in Italy [J]. *Resources, Conservation and Recycling*, 2004, 41(3): 165.
- [7] Kühtz S, Zhou C, Albino V, 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.
- [8] 陆钟武,蔡九菊. 系统节能基础 [M]. 沈阳:东北大学出版社, 2010.
LU Zhongwu, CAI Jiujie. The foundation of the systems energy conservation [M]. Shenyang: Northeastern University Press, 2010.
- [9] 田玉前,戴方钦,周章华,等. 基于投入产出模型的武钢炼铁系统能耗与节能潜力分析 [J]. *武汉科技大学学报*, 2015, 38(6): 424.
TIAN Yuqian, DAI Fangqin, ZHOU Zhanghua, et al. Analysis of energy consumption and energy-saving potential of WISCO ironmaking system based on input-output model [J]. *Journal of Wuhan University of Science and Technology*, 2015, 38(6): 424.
- [10] LIANG Sai, JIA Xiaoping, ZHANG Tianzhu. Three-dimensional hybrid enterprise input-output model for material metabolism analysis; a case study of coal mines in China [J]. *Clean Technologies and Environmental Policy*, 2011, 13(1): 71.
- [11] Yazan D M. Constructing joint production chains: An enterprise input-output approach for alternative energy use [J]. *Resources, Conservation and Recycling*, 2016, 107: 38.
- [12] Alcántara V, Del Río P, Hernández F. Structural analysis of electricity consumption by productive sectors: the Spanish case [J]. *Energy*, 2010, 35(5): 2088.
- [13] Yuan C, Liu S, Xie N. The impact on Chinese economic growth and energy consumption of the global financial crisis: an input-output analysis [J]. *Energy*, 2010, 35(4): 1805.
- [14] Taracón M, Del Río P, Callejas F. Determining the responsibility of manufacturing sectors regarding electricity consumption: the Spanish case [J]. *Energy*, 2011, 36(1): 46.
- [15] Yuan R, Zhao T. A combined input-output and sensitivity analysis of CO₂ emissions in the high energy-consuming industries: a case study of China [J]. *Atmospheric Pollution Research*, 2016, 7(2): 315.
- [16] Yan J, Zhao T, Kang J. Sensitivity analysis of technology and supply change for CO₂ emission intensity of energy-intensive industries based on input-output model [J]. *Applied Energy*, 2016, 171: 456.
- [17] Hondo H, Sakai S, Tanno S. Sensitivity analysis of total CO₂ emission intensities estimated using an input-output table [J]. *Applied Energy*, 2002, 72(3/4): 689.
- [18] Tarancon M A, Del Río P. Assessing energy-related CO₂ emissions with sensitivity analysis and input-output techniques [J]. *Energy*, 2012, 37(1): 161.
- [19] 苏醒,罗仲,张旭. 中国能源系统生命周期碳排放的时间有效性 [J]. *同济大学学报:自然科学版*, 2016, 44(5): 773.
SU Xing, LUO Zhong, ZHANG Xu. Temporal validity of energy system life cycle carbon emissions in China [J]. *Journal of Tongji University: Natural Science*, 2016, 44(5): 773.
- [20] Worldsteel Association. CO₂ emissions data collection [R]. [S. l.]: Worldsteel Association, 2012.
- [21] Liu X, Wang H T, Chen J, et al. Method and basic model for development of Chinese reference Life cycle database of fundamental industries [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2010, 30(10): 2136.
- [22] Norgate T, Haque N. Energy and greenhouse gas impacts of mining and mineral processing operations [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2010, 18(3): 266.
- [23] Marinković S, Radonjanin V, Malešev M, et al. Comparative environmental assessment of natural and recycled aggregate concrete [J]. *Waste Management*, 2010, 30(11): 2255.
- [24] Jiang R, Wang H, Zhang H, et al. Life cycle assessment of cement technologies in China and recommendations [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2010, 30(11): 2361.
- [25] Chen C, Habert G, Bouzidi Y, et al. LCA allocation procedure used as an incitative method for waste recycling: an application to mineral additions in concrete [J]. *Resources, Conservation and Recycling*, 2010, 54(12): 1231.