

0370-378

# 钢铁生产流程的物流对能耗的影响\*

TF087  
TF4

陆钟武 蔡九菊 于庆波  
(东北大学材料与冶金学院, 沈阳 110006)

谢安国  
(鞍山钢铁学院冶金系, 鞍山 114002)

**摘要** 提出了钢铁生产流程基准物流图的概念, 分析了偏离基准物流图的各股物流对吨材能耗和吨钢能耗的影响. 以某钢厂生产数据为例, 分析了生产流程的物流对能耗的影响.

**关键词** 基准物流图, 吨材能耗, 吨钢能耗

钢铁生产流程

**中图分类号** TF4

**文献标识码** A

**文章编号** 0412-1961(2000)04-0370-09

## THE INFLUENCES OF MATERIALS FLOWS IN STEEL MANUFACTURING PROCESS ON ITS ENERGY INTENSITY

LU Zhongwu, CAI Jiujū, YU Qingbo  
School of Materials and Metallurgy, Northeastern University, Shenyang 110006

XIE Anguo  
Department of Metallurgy, Anshan Iron and Steel Institute, Anshan 114002

Correspondent: LU Zhongwu, member of The Chinese Academy of Engineering, Tel: (024)23890704,  
Fax: (024)23906316

Manuscript received 1999-12-08, in revised form 2000-01-25

F407.365  
F407.338

**ABSTRACT** The concept of standard materials flows diagram of steel manufacturing process was proposed. The influences of materials flows deviated in various ways from standard materials flows diagram on energy intensities of crude steel and of final product were analyzed. By using the data of a steel plant, the influences of materials flows in manufacturing process on its energy intensity were analyzed as an example.

**KEY WORDS** standard materials flows diagram, energy intensity of final product, energy intensity of crude steel

在钢铁生产中, 矿石等原料要经过一系列物理和化学变化, 方能成为最终产品. 对生产流程而言, 不但物料的物理化学变化很重要, 而且物料的流动也很重要. 尤其从工程角度看问题, 后者的重要性更为明显.

钢铁生产流程中物料的流动情况很复杂. 某些钢铁联合企业里庞大的货运系统, 至少从一个侧面反映了这一问题的复杂性. 仅就流动本身而言, 就包括流向、流量、流速、流动距离等多个参数. 何况在研究物流时, 还必须注意到物料的物理、化学参数. 所有这些参数对生产流程的技术经济指标均有直接的影响.

系统节能理论以“载能体”和“系统”这两个概念为基础<sup>[1,2]</sup>, 十分强调非能源的重要性, 提出了  $e-p$  分析

法<sup>[3,4]</sup>. 但是, 对于钢铁流程中的物流状况仍然缺乏深入的研究.

本文的研究内容为: (1) 构思了钢铁生产流程的基准物流图; (2) 讨论了钢铁生产流程偏离基准物流图对吨材能耗的影响; (3) 讨论了钢铁生产流程偏离基准物流图对吨钢能耗的影响; (4) 以工厂实例说明钢铁生产的物流对能耗的影响.

### 1 钢铁生产流程的基准物流图

为了便于分析钢铁生产流程的物流对能耗的影响, 构思了“全封闭单行道”式的钢铁生产流程物流图: (1) 全流程中含 Fe 物料的唯一流向是从上游工序流向下道工序; (2) 在流程的中途, 无含 Fe 物料的输入、输出. 本文把能同时满足以上两个条件, 并以 1 t 钢材为最终产品的物流图, 定义为钢铁生产流程的基准物流图.

#### 1.1 高炉 - 转炉流程

图 1 是高炉 - 转炉流程的基准物流图. 图中每个圆

\* 收到初稿日期: 1999-12-08, 收到修改稿日期: 2000-01-25

作者简介: 陆钟武, 男, 1929 年生, 中国工程院院士

圈代表一道工序, 圈内的号码 (1, 2, 3, …, 8) 是工序的序号, 箭头表示含 Fe 物料的流向. 在各箭头的下方, 标明了每吨物料中 Fe 元素的重量 ( $C_1, C_2, C_3, C_4$ , 吨 Fe 元素 / 吨物料); 第 5 道工序产出的是钢水, 设  $C_5=1$ ; 其后各道工序的物料成分不变, 故亦设  $C_6=C_7=C_8=1$ .

在以上诸道工序的实物产量中, Fe 元素的重量都是 1 t, 因为  $C_1 \times 1 / C_1 = 1, C_2 \times 1 / C_2 = 1, C_3 \times 1 / C_3 = 1, C_4 \times 1 / C_4 = 1$ . 图中每个圆圈上面所标的  $e_{01}, e_{02}, \dots, e_{08}$  分别是各道工序的工序能耗, kgce/t 合格实物产品. 基于这张基准物流图, 可求得全流程的吨材能耗 (简称基准吨材能耗)

$$E_0 = \frac{e_{01}}{C_1} + \frac{e_{02}}{C_2} + \frac{e_{03}}{C_3} + \frac{e_{04}}{C_4} + e_{05} + e_{06} + e_{07} + e_{08} \quad (1)$$

式 (1) 是同各种物流状况下高炉 - 转炉流程的能耗值进行对比的基准式.

此外, 由图 1 可见, 钢产量等于钢材产量, 均为 1 t, 所以  $E_0$  也是基准物流情况下全流程的吨钢能耗 (简称基准吨钢能耗).

### 1.2 电炉流程

假定电炉流程采用全废钢冶炼工艺. 这样, 去掉图 1 中的前 4 道工序, 便是电炉流程的基准物流图. 当然, 第 5 道工序 (电炉炼钢) 的工序能耗值不同于图 1 中的  $e_{05}$  值, 令其为  $e'_{05}$ . 这样, 基于电炉流程的基准物流图, 可求得该流程的基准吨材能耗

$$E'_0 = e'_{05} + e_{06} + e_{07} + e_{08} \quad (2)$$

式 (2) 是同各种物流状况下电炉流程的实际能耗值

进行对比的基准式. 很明显,  $E'_0$  也是电炉流程的基准吨钢能耗.

### 2 钢铁生产流程偏离基准物流图对于吨材能耗的影响

钢铁生产流程的物流不可能满足上节提到的两个假设条件, 偏离基准物流图的情况是普遍存在的. 本节以图 1 为基础, 举几个最典型的例子加以分析说明.

#### 2.1 例 1: 不合格产品或者废品在工序内部返回, 重新处理

以图 1 中的工序 3 为例说明这种情况下的物流及其对能耗的影响. 这道工序合格的实物产量仍应保持原来的数量, 即  $1/C_3$  t, 但与此同时, 产出了一些不合格品或废品, 其数量为原产量的  $\beta$  倍 ( $\beta < 1$ ). 因此, 总的实物产量增至  $(1+\beta)/C_3$  t. 其中,  $\beta/C_3$  t 不合格产品或废品返回到本工序入口端, 重新处理, 见图 2. 如上节所见, 原来这道工序产出  $1/C_3$  t 实物时总能耗为  $e_{03}/C_3$  kg 标煤. 现因实物产量 (合格与不合格产品均在内) 增加到了  $(1+\beta)/C_3$  t, 因此使这道工序总的能耗增至  $(1+\beta)e_{03}/C_3$  kg 标煤. 这样, 在其它各道工序的物流和能耗都不变的情况下, 仅因工序 3 的上述变化, 就使吨材能耗变为

$$E_1 = \frac{e_{01}}{C_1} + \frac{e_{02}}{C_2} + \frac{(1+\beta)e_{03}}{C_3} + \frac{E_{04}}{C_4} + e_{05} + e_{06} + e_{07} + e_{08} \quad (3)$$

与基准吨材能耗  $E_0$  相比, 其增量为

$$E_1 - E_0 = \beta \frac{e_{03}}{C_3} \quad (4)$$

由此可见, 在其它条件相同的情况下, 工序内部不合格产品或废品的返回量愈大, 吨材能耗的增量愈大. 为了

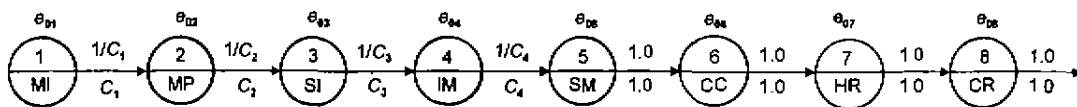


图 1 高炉 - 转炉流程的基准物流图

Fig.1 The standard materials flows diagram for blast furnace-converter process

MI—mining, MP—mineral processing, SI—sintering, IM—ironmaking,

SM—steelmaking, CC—continuous casting, HR—hot rolling, CR—cold rolling

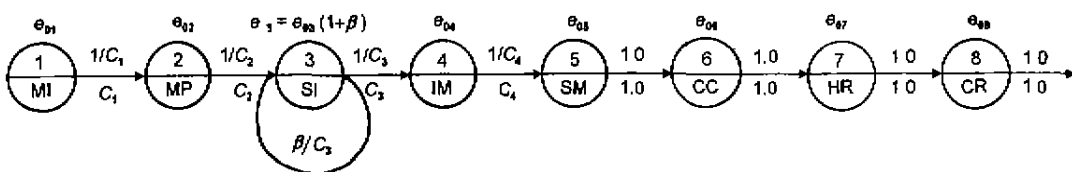


图 2 例 1 的物流图

Fig.2 The materials flows diagram for example 1

降低能耗, 必须努力降低  $\beta$  值, 此外, 补充说明这种情况下对工序能耗的理解和计算方法如下: 按规定, 工序能耗 = 工序总能耗 / 工序合格实物产品量, 所以, 在有返料的情况下, 工序 3 的工序能耗

$$e_3 = \frac{(1 + \beta)e_{03}/C_3}{1/C_3} = e_{03}(1 + \beta) \quad (5)$$

该工序能耗的计算式已在图 2 中标明。

**2.2 例 2: 下游工序的不合格产品或废品返回上游工序重新处理**

以图 1 中的工序 7 为例, 说明这种情况下的物流及其对能耗的影响, 见图 3。由图可见, 工序 7 的不合格产品及废品返回到工序 5 重新处理, 工序 7 的合格产品仍应保持原来的数量, 即 1 t, 但与此同时, 有不合格产品或废品, 其数量为原产量的  $\beta$  倍 ( $\beta < 1$ )。因此, 总的实物产量增至  $(1 + \beta)$  t, 其中  $\beta$  t 不合格产品或废品返回工序 5 重新处理, 则第 5, 6 两道工序的实物产量都将增至  $(1 + \beta)$  t。

由前面的讨论可知, 工序 7 的工序能耗由原来的  $e_{07}$  变为  $e_7$ , 即

$$e_7 = e_{07}(1 + \beta)$$

此外, 第 5 和第 6 两道工序各自的总能耗, 分别增至  $e_{05}(1 + \beta)$  和  $e_{06}(1 + \beta)$ 。这样, 吨材能耗变为

$$E_2 = \frac{e_{01}}{C_1} + \frac{e_{02}}{C_2} + \frac{e_{03}}{C_3} + \frac{e_{04}}{C_4} + (1 + \beta)(e_{05} + e_{06} + e_{07}) + e_{08} \quad (6)$$

与基准吨材能耗  $E_0$  相比, 其增量为

$$E_2 - E_0 = \beta(e_{05} + e_{06} + e_{07}) \quad (7)$$

可见, 在其它条件相同的情况下, 向上游工序的返料量愈大, 则吨材能耗的增量愈大。为了降低能耗, 必须降低返料量。此外还可以看出, 不合格产品或废品返回的距离 (按进出两工序的序号差值计) 愈大, 则吨材能耗的增量愈大。

**2.3 例 3: 下游工序含 Fe 副产品返回上游工序重新进入生产流程**

以工序 7 为例, 说明这种情况下的物流及其对能耗的影响 (见图 4)。由图可见, 工序 7 产生的含 Fe 副产品 (如氧化铁皮) 返回工序 3, 重新进入生产流程。设对应于 1 t 工序 7 的合格产品, 有  $\beta$  t ( $\beta < 1$ ) Fe 元素变为含 Fe 副产品 (含 Fe 副产品的重量等于  $\beta/C$  t, 其中,  $C$  为 1t 副产品中 Fe 元素的重量), 返回到上游工序去。这样不仅第 5, 6 两道工序的实物产量将增至  $(1 + \beta)$  t, 而且第 3, 4 两道工序的实物产量也相应增大。按 Fe 元素平衡计算, 这两道工序实物产量的增量分别为  $\beta/C_3$  和  $\beta/C_4$  t。与此同时, 工序 7 的工序能耗增至

$$e_7 = e_{07}(1 + \beta)$$

这样, 全流程的吨材能耗

$$E_3 = \frac{e_{01}}{C_1} + \frac{e_{02}}{C_2} + (1 + \beta)\left(\frac{e_{03}}{C_3} + \frac{e_{04}}{C_4} + e_{05} + e_{06} + e_{07}\right) + e_{08} \quad (8)$$

与基准吨材能耗  $E_0$  相比, 增量为

$$E_3 - E_0 = \beta\left(\frac{e_{03}}{C_3} + \frac{e_{04}}{C_4} + e_{05} + e_{06} + e_{07}\right) \quad (9)$$

可见, 在其它条件相同的情况下, 向上游工序返回的含 Fe 物料量愈大, 吨材能耗的增量愈大。为了降低能耗,

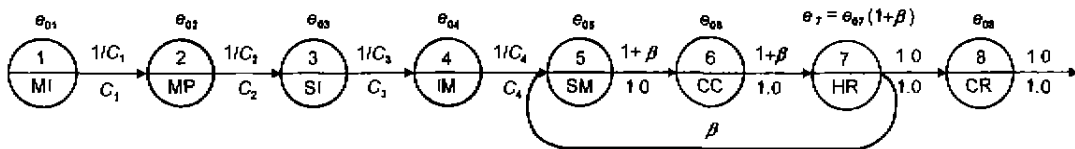


图 3 例 2 的物流图  
Fig.3 The materials flows diagram for example 2

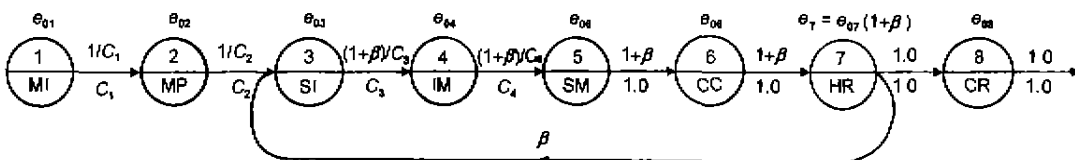


图 4 例 3 的物流图  
Fig.4 The materials flows diagram for example 3

必须减少各工序含 Fe 副产品的生成量。

**2.4 例 4: 不合格产品或废品, 或其它含 Fe 物料从某道工序向外界输出 (不回收)**

以工序 8 为例, 说明这种情况下的物流及其对能耗的影响, 见图 5。由图可见,  $\gamma t (\gamma < 1)$  不合格产品、废品或其它含 Fe 物料, 由工序 8 直接向外界输出, 例如向市场出售或散失于环境中, 工序 8 的合格产品仍为 1 t, 而总的产出物为  $(1+\gamma) t$ 。上游各道工序的实物产量都将增至  $(1+\gamma)$  倍。在这种情况下, 吨材能耗

$$E_4 = (1 + \gamma)E_0 \quad (10)$$

与基准吨材能耗  $E_0$  相比, 其增量

$$E_4 - E_0 = \gamma E_0 \quad (11)$$

由此可见, 为了降低吨材能耗, 必须努力降低各道工序直接向外界输出的不合格产品、废品或其它含 Fe 物料。此外, 不难理解, 在其它条件相同的情况下, 发生上述情况的工序序号越大, 吨材能耗的增量越大。

**2.5 例 5: 含 Fe 物料从外界输入流程的某中间工序**

以工序 5 为例, 说明这种情况下的物流及其对能耗的影响, 见图 6。

工序 5 的实物产量仍为 1 t。但与此同时, 有  $\alpha t (\alpha < 1)$  废钢从外界输入, 按含 Fe 量计算, 它相当于  $\alpha/C_4 t$  工序 5 所用的原料。因此, 从工序 4 进入工序 5 的物料量可由  $1/C_4 t$  减为  $(1-\alpha)/C_4 t$ 。上游各工序之间的物流量也相应减少。这样, 全流程的吨材能耗

$$E_5 = (1 - \alpha) \left( \frac{e_{01}}{C_1} + \frac{e_{02}}{C_2} + \frac{e_{03}}{C_3} + \frac{e_{04}}{C_4} \right) + e_{05} + e_{06} + e_{07} + e_{08} \quad (12)$$

与基准吨材能耗  $E_0$  相比, 其增量等于

$$E_5 - E_0 = (-\alpha) \left( \frac{e_{01}}{C_1} + \frac{e_{02}}{C_2} + \frac{e_{03}}{C_3} + \frac{e_{04}}{C_4} \right) \quad (13)$$

由此可见, 吨材能耗降低了。工序 5 吃进较多的外购废钢是节能的重要措施。

**3 钢铁生产流程偏离基准物流图对于吨钢能耗的影响**

前一节的讨论都是以吨材为基准的: 流程的最终产品是 1 t 钢材; 吨材能耗为生产 1 t 钢材全流程的能耗。而吨钢能耗是以吨钢为基准的: 吨钢能耗为炼钢工序的产品为 1 t 合格钢坯 (或钢锭) 时全流程的能耗; 流程的最终产品 (钢材) 一般不到 1 t。

吨钢能耗是钢铁工业通用的能耗指标。本节讨论钢铁生产流程偏离基准物流图对吨钢能耗的影响。

**3.1 例 6: 同例 2, 但以吨钢为基准**

这种情况下的物流如图 7 所示。图中第 5, 6 两道工序的实物量都是 1 t, 但到工序 7 时, 因为有  $\beta t (\beta < 1)$  废品产生, 如切头切尾等, 所以这道工序的合格产品仅为  $(1-\beta) t$ 。  $\beta t$  废品返回到工序 5 重新处理。这些返回料可部分地取代该工序所需的原料。按 Fe 元素平衡计算,  $\beta t$  返回料相当于  $\beta/C_4 t$  工序 5 的原料。即第 4 道工序的实物产量可减为  $(1/C_4 - \beta/C_4) t$ 。同理, 第 1, 2, 3 道工序的实物产量也可相应减少。全流程各道工序的实物产量如图 7 中各箭头上所标。

这样, 与图 7 对应的吨钢能耗  $E_6$  等于

$$E_6 = (1 - \beta) \left( \frac{e_{01}}{C_1} + \frac{e_{02}}{C_2} + \frac{e_{03}}{C_3} + \frac{e_{04}}{C_4} \right) + e_{05} + e_{06} + e_{07} + (1 - \beta)e_{08} \quad (14)$$

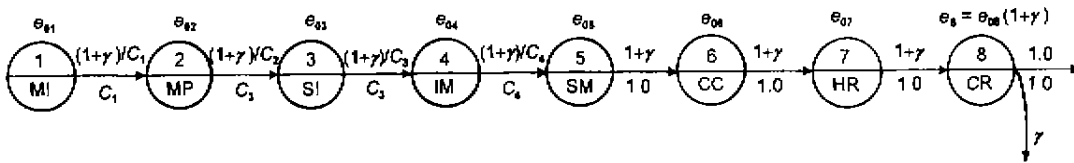


图 5 例 4 的物流图

Fig.5 The materials flows diagram for example 4

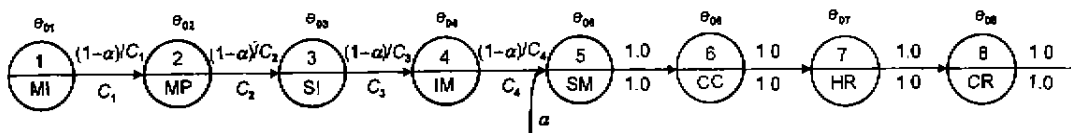


图 6 例 5 的物流图

Fig.6 The materials flows diagram for example 5

工序7的总能耗 = 工序能耗 × 合格实物量 =  $e_{07}(1-\beta)/(1-\beta) = e_{07}$ . 与基准吨钢(或吨材)能耗相比较,其增量为

$$E_6 - E_0 = (-\beta) \left( \frac{e_{01}}{C_1} + \frac{e_{02}}{C_2} + \frac{e_{03}}{C_3} + \frac{e_{04}}{C_4} + e_{08} \right) \quad (15)$$

式(15)表明,与不产生废品的情况相比,在有废品产生的情况下,全流程的吨钢能耗反而降低了,且废品越多,吨钢能耗越低.这是吨钢能耗指标本身的一个弊端.

**3.2 例7: 同例4, 但以吨钢为基准**

这种情况下的物流,如图8所示.图中第5,6,7工序的实物产量都是1t.但工序8有 $\gamma t (\gamma < 1)$ 不合格产品或废品产生,而且不回收,直接向外界输出.工序8的合格产品减至 $(1-\gamma)t$ ,同时工序能耗上升为 $e_{08}/(1-\gamma)$ ,而工序8的总能耗仍为 $e_{08}$ ,因为 $(1-\gamma)e_{08}/(1-\gamma) = e_{08}$ .

图中第1—4道工序的实物产量仍分别为 $1/C_1, 1/C_2, 1/C_3, 1/C_4$ ,没有发生变化.这样,本例情况下的吨钢能耗

$$E_7 = \frac{e_{01}}{C_1} + \frac{e_{02}}{C_2} + \frac{e_{03}}{C_3} + \frac{e_{04}}{C_4} + e_{05} + e_{06} + e_{07} + e_{08} \quad (16)$$

式(16)等号右侧各项与式(1)完全相同.亦即虽然工序8向外输出 $\gamma t$ 不合格产品或废品,但在吨钢能耗的数值上,一点也没有反映出来.这当然是不妥的.但必须指出,吨钢能耗这个指标仍应继续使用,因为钢材的品种、规格很多,实际工作中不可能以钢材为基准去计算能耗值.当然,对主要品种进行必要的计算也是未尝不可的.

**4 钢铁生产流程的实际物流图及其能耗分析**

钢铁生产流程偏离基准物流图的情况,绝不像以上所举各个典型例子那么简单.实际上各道工序都可能发生偏离基准物流图的现象,而且在同一道工序中还可能存在着这种现象,甚至同一种现象亦包括几股不同的物流.因

此,钢铁生产流程的实际物流图十分复杂.不过,以上各典型例子已足以用来分析钢铁生产流程的实际物流图,以及它与能耗之间的关系.

运用实际物流图进行能耗分析工作,大致可按以下三步进行:

(1) 选定钢厂的某一流程,收集统计期内有关物流和能耗数据,弄清各股物流的来龙去脉,绘制出该流程的两张实际物流图,一张以吨材为计算基准,另一张以吨钢为计算基准;

(2) 以这两张实际物流图为依据,绘出基准物流图;

(3) 对照基准物流图,分析实际物流对能耗的影响,其中包括吨材能耗和吨钢能耗.

以吨材为计算基准的实际物流图中,各股物流的流量等于统计期内这些股实物流量分别除以钢材产量;以吨钢为计算基准的实际物流图中,各股物流的流量等于统计期内这些股实物流量分别除以钢产量.

以实际物流图为依据,绘制基准物流图时,需标出各工序的实物产量,以及各工序能耗.在基准物流图上,很容易标出各工序的实物产量,因为炼钢以后各工序(炼钢、连铸、热轧、冷轧)的实物产量都是1t;铁前各工序的实物产量也只决定于各工序产品的实际含Fe量,即:采矿、选矿、烧结和炼铁诸工序的实物产量分别等于 $1/C_1, 1/C_2, 1/C_3$ 及 $1/C_4$ t.

基准物流图上的各工序能耗(以下简称“基准工序能耗”),要按实际物流图的工序能耗(以下简称“实际工序能耗”)反算才能求得.例如,在上述的例2中,工序7有 $\beta t$ 不合格产品及废品返回上游工序去重新处理,所以该工序能耗由原来的 $e_{07}$ (基准工序能耗)增至 $e_7 = e_{07}(1+\beta)$ ,其中 $e_7$ 是该情况下的实际工序能耗.所以,该工序的基准工序能耗等于

$$e_{07} = \frac{e_7}{1+\beta} \quad (17)$$

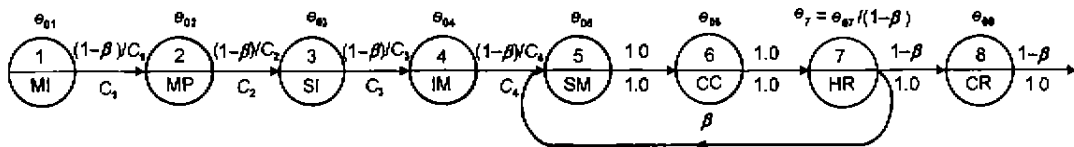


图7 例6的物流图  
Fig.7 The materials flows diagram for example 6

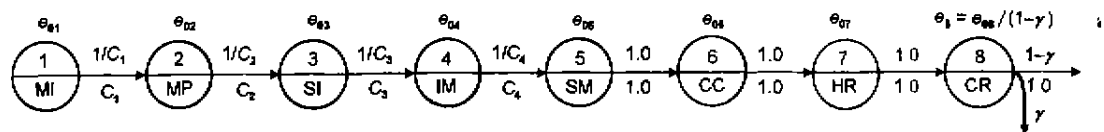


图8 例7的物流图  
Fig.8 The materials flows diagram for example 7

式 (17) 表明了从实际工序能耗反算基准工序能耗的基本方法。有多股物流影响工序能耗时, 反算方法不变, 只是要把多股物流的影响叠加起来, 比较复杂。

此外, 还可按第 2, 3 节所述的单因素分析法计算每股物流的单位变化量 (即每增减 1 kg), 对于流程能耗的影响。这样可以对比各股物流对于能耗影响的重要性。

最后, 不仅要分析各股物流对吨钢能耗的影响, 而且还要有重点地分析对吨材能耗的影响。这样可以在研究节能对策工作中避免计算结果对决策可能产生的误导。

### 5 工厂实例

基于以上原理, 现以某厂为对象, 具体分析钢铁生产流程的物流对能耗的影响。该厂的主要生产流程由烧结、炼铁、炼钢、初轧和轧材等五道工序组成。

#### 5.1 物流图

按该厂某年度的平均生产数据绘制生产流程的物流

图。图 9 是以 1 t 材为计算基准的实际物流图。图中每个箭头上标明了各股物流的实物量, 并在括号中标明了与之相当的 Fe 元素重量。这五道工序的编号分别为 3, 4, 5, 6, 7。

图 10 是以 1 t 钢为计算基准的实际物流图。图 11 是根据图 9 或图 10 绘出的与之相对应的基准物流图。

#### 5.2 能耗计算和分析

##### 5.2.1 基准吨材能耗与实际吨材能耗的计算和对比

按图 9 可求得该流程的实际吨材能耗

$$\begin{aligned}
 E_c &= 70 \times 2.037 + 494 \times 1.123 + 81 \times 1.270 + \\
 &50 \times (1.069 + 0.056) + 134 \times 1 \\
 &= 142.5 + 554.8 + 102.9 + 56.3 + 134.0 \\
 &= 990.5 \tag{18}
 \end{aligned}$$

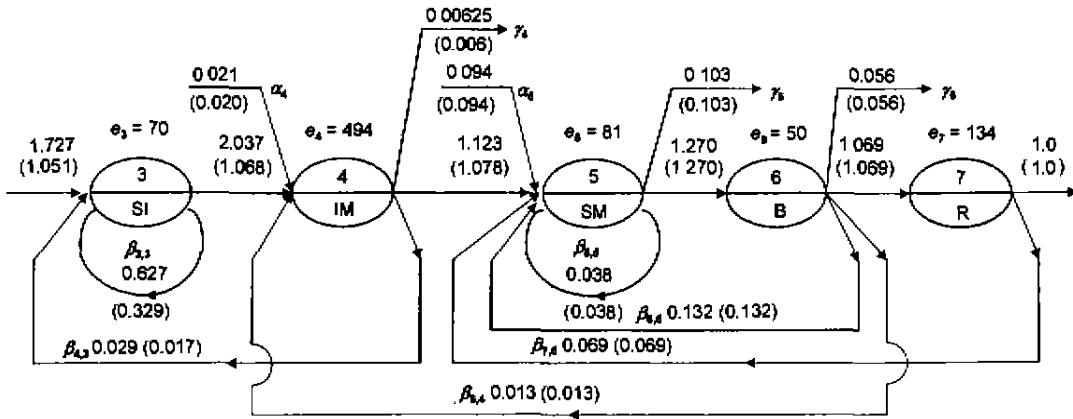


图 9 某厂生产流程的实际物流图 (以 1 t 材为基准)

Fig.9 The materials flows diagram for a real manufacturing process (based on 1 t final product)  
B — blooming R — rolling

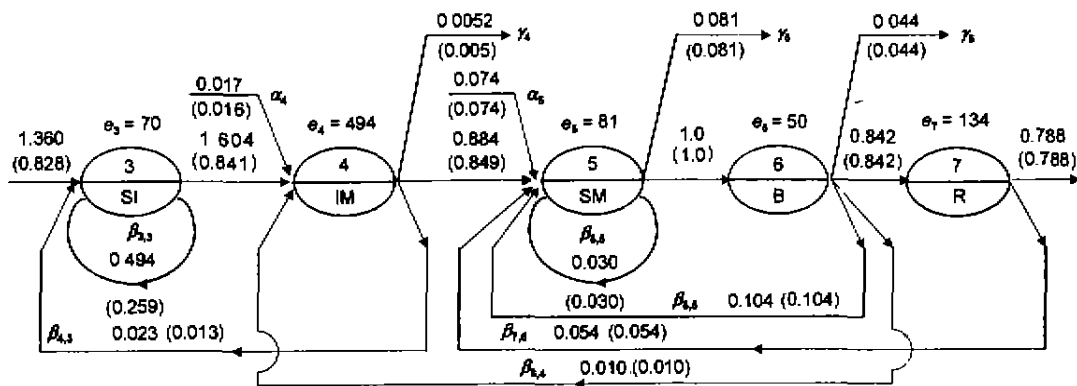


图 10 某厂生产流程的实际物流图 (以 1 t 钢为基准)

Fig.10 The materials flows diagram for a real manufacturing process (based on 1 t crude steel)

按图 11 可求得该流程的基准吨材能耗

$$\begin{aligned}
 E_0 &= 53.5 \times 1.907 + 483.7 \times 1.042 + \\
 &72.9 \times 1 + 44.3 \times 1 + 125.4 \times 1 \\
 &= 102.0 + 504.0 + 72.9 + 44.3 + 125.4 \\
 &= 848.6 \quad (19)
 \end{aligned}$$

表 1 中列出了上述计算结果. 根据以上两算式等号右侧各工序能耗及材比系数的差值, 不难求得它们各自对能耗的影响量 (见表 1 的最后两行). 工序的“材比系数”是指该工序的实物产量与材产量之比.

由表 1 可见, 该厂的实际吨材能耗比基准吨材能耗高出 141.9 kgce/t 材. 其中, 因实际工序能耗高于基准工序能耗而引起的能耗增量为 70.4 kgce/t 材, 且增量最大的工序是烧结工序; 因材比系数的差值而引起的能耗增量为 71.5 kgce/t 材, 增量最大的工序是炼铁工序.

5.2.2 基准吨钢能耗与实际吨钢能耗的计算和对比

基准吨钢能耗同基准吨材能耗的数值相等, 即 848.6 kgce/t 钢.

按图 10 可求得该流程的实际吨钢能耗

$$\begin{aligned}
 E_s &= 70 \times 1.604 + 494 \times 0.884 + 81 \times 1.0 + \\
 &50 \times (0.842 + 0.044) + 134 \times 0.788 \\
 &= 112.3 + 436.7 + 81.0 + 44.3 + 105.6 \\
 &= 779.9 \quad (20)
 \end{aligned}$$

表 2 中既列出了上述计算结果, 也列出了因各工序能耗以及钢比系数的不同引起的能耗升降值. 工序的“钢比系数”是指该工序的实物产量与钢产量之比.

由表 2 可见, 实际吨钢能耗比基准吨钢能耗低 68.7 kgce/t 钢. 其中, 因工序能耗上升引起的能耗增量为 55.4 kgce/t 钢, 且增量最大的工序仍然是烧结工序; 因钢比系数不同使吨钢能耗低 124.1 kgce/t 钢, 降低幅度最大的工序是炼铁工序.

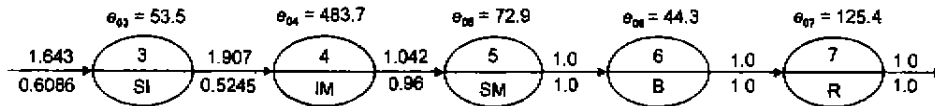


图 11 某厂生产流程的基准物流图

Fig.11 The standard materials flows diagram for a real manufacturing process

表 1 某厂实际吨材能耗和基准吨材能耗的对比

Table 1 Comparison between standard ( $E_0$ ) and real ( $E_r$ ) energy intensity of final product

Item	Process					Total
	Sintering	Ironmaking	Steelmaking	Blooming	Rolling	
$E_r$	142.5	554.8	102.9	56.3	134.0	990.5
$E_0$	102.0	504.0	72.9	44.3	125.4	848.6
$E_r - E_0$	40.5	50.8	30.0	12.0	8.6	141.9
(Due to process energy intensities)	(33.5)	(11.6)	(10.3)	(6.4)	(8.6)	(70.4)
(Due to product ratios)	(7.0)	(39.2)	(19.7)	(5.6)	(0.0)	(71.5)

表 2 某厂实际吨钢能耗和基准吨钢能耗的对比

Table 2 Comparison between standard ( $E_0$ ) and real ( $E_s$ ) energy intensity of crude steel

Item	Process					Total
	Sintering	Ironmaking	Steelmaking	Blooming	Rolling	
$E_s$	112.3	436.7	81.0	44.3	105.6	779.9
$E_0$	102.0	504.0	72.9	44.3	125.4	848.6
$E_s - E_0$	10.3	-67.3	8.1	0.0	-19.8	-68.7
(Due to process energy intensities)	(26.4)	(9.0)	(8.1)	(5.1)	(6.8)	(55.4)
(Due to steel ratios)	(-16.1)	(-76.3)	(0.0)	(-5.1)	(-26.6)	(-124.1)

5.2.3 每股物流对工序能耗和材比系数的影响 影响各工序的工序能耗和材比系数的物流共有 11 股. 这些股物流, 有的只影响工序能耗, 有的只影响材比系数, 有的既影响工序能耗又影响材比系数.

这些股物流对材比系数的影响列于表 3.

该表横向分为 14 行, 前 11 行是影响材比系数的各股物流; 纵向分为 5 列, 各代表一道生产工序. 在表中列出各股物流对工序材比系数的影响量 (t/t 材). 表中的第 12 行是各股物流对材比系数影响量的合计值, 第 13 行填写基准材比系数. 基准材比系数加上各股物流对材比系数的影响总量, 正好等于实际材比系数 (第 14 行).

各股物流对工序能耗的影响列于表 4. 表中第 12 行是各股物流对工序能耗影响量的合计值, 第 13 行是基准工序能耗, 它与 12 行的数字相加, 正好等于实际物流图中的实际工序能耗.

5.2.4 各股物流的单位增减量对能耗的影响 各股物流每增减 1 kg 对吨材能耗的影响列于表 5.

由表 5 可见, 就吨材能耗而言, 转炉多吃 1 kg 外购废钢与多吃 1 kg 自产废钢, 二者对能耗的影响完全不同. 前者可降低吨材能耗 0.6060 kgce, 而后者反而使之上升 0.1172 kgce. 各种含 Fe 物料返回上游工序加以利用, 虽然没有浪费这些物料, 却要付出增加能耗的代价. 每增加

表 3 各股物流对材比系数的影响

Table 3 The influences of materials flows on product ratios

Factors	(t process product/t final product)				
	Sintering	Ironmaking	Steelmaking	Blooming	Rolling
Recycled sinter $\beta_{3,3}$	0.000				
Purchased iron scrap for blast furnace (BF) $\alpha_4$	-0.037	0.000			
Ash from BF gas for sintering $\beta_{4,3}$	0.033	0.000			
Iron loss of BF $\gamma_4$	0.011	0.000			
Purchased steel scrap for converter $\alpha_5$	-0.180	-0.098	0.000		
Recycled steel for converter $\beta_{5,5}$	0.000	0.000	0.000		
Iron loss of converter $\gamma_5$	0.196	0.1073	0.000		
Steel scrap from blooming mill for BF $\beta_{6,4}$		0.0134	0.014	0.000	
Steel scrap from blooming mill for converter $\beta_{6,5}$			0.132	0.000	
Sale of billets $\gamma_6$	0.107	0.0583	0.056	0.055	
Steel scrap from rolling mill for converter $\beta_{7,5}$			0.068	0.070	0.000
Total	0.130	0.081	0.270	0.125	0.000
Standard product ratio	1.907	1.042	1.000	1.000	1.000
Real product ratio	2.037	1.123	1.270	1.125	1.000

表 4 各股物流对工序能耗的影响

Table 4 The influences of materials flows on process energy intensities

Factors	(kgce/t process product)				
	Sintering	Ironmaking	Steelmaking	Blooming	Rolling
Recycled sinter $\beta_{3,3}$	16.5				
Purchased iron scrap for blast furnace (BF) $\alpha_4$		0.0			
Ash from BF gas for sintering $\beta_{4,3}$		7.6			
Iron loss of BF $\gamma_4$		2.7			
Purchased steel scrap for converter $\alpha_5$			0.0		
Recycled steel for converter $\beta_{5,5}$			2.2		
Iron loss of converter $\gamma_5$			5.9		
Steel scrap from blooming mill for BF $\beta_{6,4}$				0.5	
Steel scrap from blooming mill for converter $\beta_{6,5}$				5.2	
Sale of billets $\gamma_6$				0.0	
Steel scrap from rolling mill for converter $\beta_{7,5}$					8.6
Total	16.5	10.3	8.1	5.7	8.6
Standard process energy intensity	53.5	483.7	72.9	44.3	125.4
Real process energy intensity	70.0	494.0	81.0	50.0	134.0



表 5 各股物流的单位增减量对吨材能耗的影响

Table 5 The influences of unit increment of materials flow quantities on energy intensity of final product

Factor (increment of 1 kg material flow/t final product)	Variation of energy intensity of final product (kgce/t final product)
Purchased iron scrap for blast furnace (BF)	-0.1020
Purchased steel scrap for converter	-0.6060
Recycled sinter	0.0535
Ash from BF gas for sintering	0.3514
Recycled steel for converter	0.0729
Steel scrap from blooming mill for converter	0.1172
Roll scale from rolling mill for sintering <sup>1)</sup>	0.5940
Loss of sinter <sup>1)</sup>	0.0535
Sale of pig iron <sup>1)</sup>	0.5322
Steel loss of converter	0.6788
Sale of billets	0.7232
Steel loss of rolling <sup>1)</sup>	0.8486

1) absent in Fig.9

1 kg 返回利用的高炉瓦斯灰、轧钢铁皮, 分别使吨材能耗上升 0.3514 和 0.5940 kgce. 此外, 表 5 还说明, 外卖中间产品, 是使吨材能耗上升的重要因素. 例如, 外卖钢坯每增加 1 kg, 吨材能耗则上升 0.7232 kgce.

至于各股物流的单位增减量对吨钢能耗的影响, 也可用同样方法给出, 在此不再重复.

## 6 结论

(1) 物流问题是钢铁生产流程中的一个关键问题, 对钢铁企业乃至钢铁工业的能源消耗影响极大, 必须引起充分重视.

(2) 基准物流图是定量分析钢铁生产流程中复杂物流问题的基础, 把它与实际物流图进行全面、定量的比较, 可以将物流对能耗的影响分析得十分清楚.

(3) 在钢铁生产流程中, 凡是由外界向某中间工序输入含 Fe 物料, 必有利于节能, 且越是后部工序, 节能越显著; 凡是由某工序向外界输出或返回上游工序重新处理含 Fe 物料, 必增大该工序能耗及上游工序的实物产量, 从而增大吨材能耗, 且越是后部工序, 耗能越多; 凡在工

序内部循环使用含 Fe 物料, 必使本工序能耗增大.

(4) 正确评价钢铁生产流程的能耗指标应是最终产品能耗, 即吨材能耗, 而不是吨钢(综合)能耗. 在继续沿用吨钢能耗这一指标的前提下, 各企业有重点地针对个别流程进行吨材能耗分析, 对于决策者必有裨益.

## 参考文献

- [1] Lu Z W. *Utilization of Energy in Metallurgical Industry*. Beijing: Metallurgical Industry Press, 1986: 24  
(陆钟武. 冶金工业的能源利用. 北京: 冶金工业出版社, 1986: 24)
- [2] LU Z W, Cai J J. *Introduction to Systems Energy Conservation*. Beijing: Science Press, 1993: 14  
(陆钟武, 蔡九菊. 系统节能基础. 北京: 科学出版社, 1993: 14)
- [3] LU Z W. *Energy Metall Ind*, 1992; 11(1): 1  
(陆钟武. 冶金能源, 1992; 11(1): 1)
- [4] Lu Z W, Zhai Q G, Xie A G, Cai J J, Meng Q S. *Iron Steel*, 1997; 32(5): 69  
(陆钟武, 翟庆国, 谢安国, 蔡九菊, 孟庆生. 钢铁, 1997; 32(5): 69)