

⑧ 379-382

钢铁生产流程中物流对能耗影响的计算方法 *

于庆波 陆钟武[✓] 蔡九菊

(东北大学材料与冶金学院, 沈阳 110006)

摘 要 从“基准物流图”的概念入手, 分析了含铁物料在实际钢铁生产流程各工序中可能发生的流动情况, 给出了偏离“基准物流图”的各股物流对能耗影响的计算公式及其计算步骤.

关键词 基准物流图, 能耗

中图法分类号 TF4

钢铁生产流程 物流

文献标识码 A

文章编号

0412-1961(2000)04-0379-05

STUDY ON THE METHOD FOR CALCULATING INFLUENCE OF MASS FLOW ON ENERGY CONSUMPTION IN STEEL MANUFACTURING PROCESS

YU Qingbo, LU Zhongwu, CAI Jiujie

School of Materials and Metallurgy, Northeastern University, Shenyang 110006

Correspondent: YU Qingbo, associate professor, Tel: (024)23912374, Fax: (024)23906316

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

ABSTRACT Based on the concept of fundamental mass flow chart, all possible situation of ferric material flow in steel manufacturing process have been analyzed. The influence expressions of mass flow of deviated from fundamental mass flow chart on energy consumption were put forward.

KEY WORDS fundamental mass flow chart, energy consumption

TF087
TF4

系统节能理论强调节能工作既要考虑节约能源, 又要考虑节约非能源 (即物料), 而且为了强调非能源的重要性, 特意提出了“钢比系数”的概念, 并运用 $e-p$ 分析法成功地剖析了我国钢铁工业的能耗状况, 预测了我国未来年份的能耗值^[1,2]. 但是, $e-p$ 分析法不能用来进一步分析构成各工序“钢比系数”的内在因素以及各因素对能耗的影响, 而这一点对于指导钢铁企业如何降低各工序“钢比系数”、降低能耗, 却是至关重要的. 因此, 如何定量地计算各工序物料消耗以及它们与能耗的关系具有重要的现实意义.

文献 [3] 从含铁物料平衡入手, 将实际钢铁生产流程抽象为符合如下两个条件“全封闭单行道”式的钢铁生产流程: (1) 全流程中含铁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, 没有含铁物料的输入、输出, 并将能同时满足以上两个条件、且以 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”.

在此基础上分析了实际生产流程中含铁物料的流向、流量和流动距离等对吨材能耗和吨钢能耗的影响, 推导出了各种典型情况下物流对能耗影响的计算公式, 给出了某钢铁厂的计算实例. 为进一步分析物流对能耗的影响提供了重要的理论依据. 本文以文献 [3] 为基础, 详细介绍含铁物料物流对能耗影响的计算方法.

1 钢铁生产流程中的实际物流状况

在实际钢铁生产流程中, 含铁物料的流动情况十分复杂, 任何一道生产工序均可能发生如图 1 所示情况.

(1) 第 $i-1$ 道工序产品作为原料加入第 i 道工序, 其铁元素重量为 G_{i-1} , t/t 材 (或 t/t 钢);

(2) 作为原料从外界向第 i 道工序加入的物料, 其铁元素重量为 α_i , t/t 材 (或 t/t 钢);

(3) 第 i 道工序向外界输出的物料 (包括损失和外卖), 其铁元素重量为 $\gamma_i (= \gamma'_i + \gamma''_i)$, t/t 材 (或 t/t 钢). 其中, γ'_i 为外卖的第 i 道工序合格产品所含铁元素重量, γ''_i 为向外界输出的不合格品 (如外卖废品、生产损失等) 所含铁元素重量;

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

作者简介: 于庆波, 男, 1966 年生, 副教授, 博士

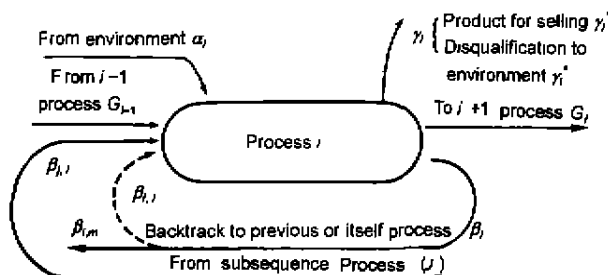


图1 含铁物料在工序中的流动情况

Fig.1 The ferric-materials flow in a process

(4) 第 i 道工序生产的不合格产品或废品, 又作为原料返回到本道工序或上游工序, 其铁元素重量为 $\beta_i (\beta_i = \beta_{i,i} + \beta_{i,m}, m=1, 2, \dots, i-1)$, t/t 材 (或 t/t 钢), 其中, $\beta_{i,i}$ 为返回到本工序的物料 (如烧结返矿) 所含铁元素重量, $\beta_{i,m}$ 为由本工序返回到上游第 m 道工序的物料 (如轧钢工序返回到炼钢工序的废钢) 所含铁元素重量;

(5) 下游第 j 道工序生产的不合格品或废品, 作为原料返回到第 i 道工序, 其铁元素重量为 $\beta_{j,i} (j = i+1, i+2, \dots, n)$, t/t 材 (或 t/t 钢);

(6) 第 i 道工序供给第 $i+1$ 道工序的合格产品, 其铁元素重量为 G_i .

根据铁元素平衡有

$$G_{i-1} + \alpha_i + \beta_{i,i} + \beta_{j,i} = G_i + \gamma_i + \beta_{i,i} + \beta_{i,m} \quad (1)$$

总的来说, 在钢铁生产流程中, 有一股从第一道工序一直贯穿到最后一道工序的主物流, 很明显, 在各相邻两工序之间这股主物流的流量并不相同。

在主物流之外, 还有三种不同类型的物流。第一类物流 (或称 α 物流), 包括各道工序从流程以外输入的各种含铁物料的各股物流; 第二类物流 (或称 β 物流), 包括从各道工序输出后又返回本工序重新处理的物流、由各道工序输出后返回它们上游重新处理的物流、以及由下游返回到各工序去的各股物流; 第三类物流 (或称 γ 物流), 包括各道工序向外界输出后不再返回本流程来的各股物流。

主物流与 α, β, γ 三类物流之间, 在数量上密切相关。所以, 为了正确地绘制流程的实际物流图, 不仅要分析弄清楚每一股 α, β, γ 物流, 而且要弄清楚它们与主物流之间的相互关系, 对每道工序而言, 铁元素重量的收支平衡, 是必须遵守的原则。

虽然以往人们也认识到物流对能耗的影响, 但由于没有一个比较基准, 无法进行定量分析, 以致于这方面的研究工作长期以来停留在定性分析阶段。“基准物流图”的概念, 为定量分析物流对能耗的影响提供了一个参照基准, 其重要性不亚于系统节能理论创立之初的“载能体”概念。

2 根据实际生产流程构筑基准物流图

在进行物流对能耗影响的分析时, 重要的工作是确定实际流程的基准物流图。有了基准物流图, 才能把它同实际物流图进行对比, 从而确定各个物流因素对能耗的影响量。基准物流图是根据实际生产流程构筑出来的。不同的生产流程, 其相应的基准物流图不同。基准物流图中的生产流程、各工序每吨物料的含铁量与实际生产是一样的。而各工序的材比系数和工序能耗是根据实际生产流程的消耗指标计算出的。假设某实际生产流程有 n 道生产工序, 各生产工序的工序能耗 (简称实际工序能耗) 和实物产品的含铁量分别为 e_i (kgce/t 工序产品) 和 C_i (t 铁/t 合格产品), 各工序含铁物料的输入和输出情况如图1所示, 则其相应的基准物流图中也有 n 道生产工序, 各工序的基准材比系数和基准工序能耗分别为

$$p_{0i} = \frac{C_n}{C_i} \quad (i = 1, 2, 3, \dots, n) \quad (2)$$

$$e_{0i} = p_{pi} / (p_{pi} + \gamma_i' / C_i + \beta_i / C_i) e_i \quad (i = 1, 2, 3, \dots, n) \quad (3)$$

式中, p_{0i} 为基准物流图中第 i 道工序的材比系数 (简称基准材比系数); C_i 为第 i 道工序生产的合格产品的含铁量; e_{0i} 为基准物流图中第 i 道工序的工序能耗 (简称基准工序能耗); p_{pi} 为实际流程第 i 道工序的材比系数 (简称实际材比系数), $p_{pi} = G_i / C_i + \gamma_i' / C_i$ 。

从式 (3) 可以看出, 基准工序能耗实质上是将工序的总能耗分摊到该工序生产的所有物料 (合格品和各种非合格品) 上, 而实际工序能耗却将工序的总能耗全部摊到了该工序生产的合格产品上, 即认为废品不耗能。

3 实际生产流程物流对吨材能耗影响的计算

吨材能耗是指生产 1 t 合格钢材 (流程的最终产品) 全流程所消耗的能源。

3.1 实际生产流程材比系数的剖析

假设某流程有 n 道生产工序, 每道工序可能发生的物流情况已在图1中给出。则在实际生产中, 各工序材比系数的表达式为

$$p_{pi} = \frac{C_n}{C_i} - \sum_{j=i+1}^n \frac{\alpha_j}{C_i} + \sum_{j=i-1}^n \frac{\gamma_j}{C_i} + \sum_{j=i+1}^n \sum_{m=1}^j \frac{\beta_{j,m}}{C_i} \quad (i = 1, 2, \dots, n-1) \quad (4)$$

式 (4) 等号右侧第一项是第 i 工序的基准材比系数, 第二项是下游各工序 (j) 输入第 i 工序的含铁物料对第 i 工序材比系数的影响, 第三项是下游各工序 (j) 向外界输出的含铁物料对第 i 工序材比系数的影响, 第四项是第 i 工序下游各工序 (j) 产生的废品返回到其上游各工序 (m) 重新处理对第 i 工序材比系数的影响, 因此, 式 (4) 可以写为

$$p_{pi} = p_{0i} + \Delta p_{pi} \quad (i = 1, 2, \dots, n) \quad (5)$$

式中, Δp_{pi} 为偏离基准物流图情况下, 物流对各工序材比系数的影响量。

比较式 (4, 5) 可知

$$p_{0i} = C_n / C_i, \quad p_{0n} = 1 \quad (6)$$

$$\Delta p_{pi} = - \sum_{j=i+1}^n \frac{\alpha_j}{C_i} + \sum_{j=i+1}^n \frac{\gamma_j}{C_i} + \sum_{j=i+1}^n \sum_{m=1}^i \frac{\beta_{j,m}}{C_i}, \quad \Delta p_{pn} = 0 \quad (7)$$

由式 (4—7) 可以看出, 实际生产流程各工序的材比系数不但与工序产品的含铁量有关, 而且还与其下游各工序的物流状况有关。

3.2 实际生产流程物流对吨材能耗的影响

实际生产流程吨材能耗的计算式为

$$E_p = e_1 p_{p1} + e_2 p_{p2} + e_3 p_{p3} + \cdots + e_i p_{pi} + \cdots + e_n p_{pn} = \sum_{i=1}^n e_i p_{pi} \quad (8)$$

基准物流情况下吨材能耗的计算式为

$$E_{0p} = e_{01} p_{01} + e_{02} p_{02} + e_{03} p_{03} + \cdots + e_{0i} p_{0i} + \cdots + e_{0n} p_{0n} = \sum_{i=1}^n e_{0i} p_{0i} \quad (9)$$

用式 (8) 减去式 (9) 可得实际吨材能耗与基准吨材能耗的差

$$\Delta E_p = E_p - E_{0p} = \sum_{i=1}^n (e_i p_{pi} - e_{0i} p_{0i}) \quad (10)$$

将式 (2—7) 代入式 (10), 整理可得

$$\Delta E_p = \sum_{i=1}^n \left[\frac{e_{0i}}{C_i} \left(- \sum_{j=i+1}^n \alpha_j + \sum_{j=i+1}^n \gamma_j + \sum_{j=i+1}^n \sum_{m=1}^i \beta_{j,m} + \gamma_i'' + \beta_i \right) \right] \quad (11)$$

式 (11) 就是实际生产流程物流对吨材能耗影响的计算式。

分析式 (3, 4, 11) 可以看出, ΔE_p 是由两方面原因造成的, 一是由于下游工序的物流改变了上游工序的材比系数, 一是由于本道工序的物流改变了工序能耗。这二者最终都会影响工序的能源总耗, 进而影响吨材能耗。

将式 (11) 展开就可得到各工序的各股物流对吨材能耗的影响量。例如, 某实际生产流程有 8 道生产工序, 在第 7 道工序加入了一部分由流程外购入的含铁物料作为生产原料, 其含铁量为 $C_{\alpha 7}$ (t 铁 / t 物料), 加入的铁元素

重量为 α_7 (t 铁 / t 工序 8 的合格产品), 则该股物流对吨材能耗的影响量为

$$\Delta E_{p\alpha 7} = -\alpha_7 \left(\frac{e_{01}}{C_1} + \frac{e_{02}}{C_2} + \frac{e_{03}}{C_3} + \frac{e_{04}}{C_4} + \frac{e_{05}}{C_5} + \frac{e_{06}}{C_6} \right) \quad (12)$$

用 $\Delta E_{p\alpha 7}$ 除以加入的该股物料的总重量, 就可以得到每增加 1 kg 该股物流对吨材能耗的影响量, 即

$$\Delta e_{p\alpha 7} = -\frac{C_{\alpha 7}}{1000} \left(\frac{e_{01}}{C_1} + \frac{e_{02}}{C_2} + \frac{e_{03}}{C_3} + \frac{e_{04}}{C_4} + \frac{e_{05}}{C_5} + \frac{e_{06}}{C_6} \right) \quad (13)$$

4 实际生产流程物流对吨钢能耗影响的计算

吨钢能耗是现行通用的一个能耗评价指标, 它是指生产 1 t 合格连铸坯 (或钢锭) 全流程所消耗的能源。

4.1 实际生产流程钢比系数的剖析

假设某流程有 n 道生产工序, 其中第 k 道工序为连铸 (或铸锭) 工序, $k-1$ 道工序为炼钢工序, 含铁物料在工序中的流动仍如图 1 所示, 则实际生产流程中各工序钢比系数的计算公式为:

(1) 连铸工序前

$$p_{si} = \frac{C_k}{C_i} - \sum_{j=i+1}^k \frac{\alpha_j}{C_i} + \sum_{j=i+1}^k \frac{\gamma_j}{C_i} + \sum_{j=i+1}^k \sum_{m=1}^i \frac{\beta_{j,m}}{C_i} - \sum_{j=k+1}^n \sum_{m=i+1}^k \frac{\beta_{j,m}}{C_i} \quad (i = 1, 2, \dots, k-1) \quad (14)$$

式 (14) 等号右侧的第一项是第 i 工序的基准钢比系数, 第二项至第四项是第 i 工序下游到连铸以前各工序的物流对第 i 工序钢比系数的影响, 第五项是连铸后各工序产生的废品返回到连铸以前第 i 工序以后的各工序重新处理对第 i 工序钢比系数的影响。

(2) 连铸工序后

$$p_{s(k+1)} = \frac{C_k}{C_{k+1}} + \frac{\alpha_{k+1}}{C_{k+1}} - \frac{\gamma_{k+1}''}{C_{k+1}} - \frac{\beta_{k+1}}{C_{k+1}} \quad (15)$$

$$p_{si} = \frac{C_k}{C_i} + \sum_{j=k+1}^{i-1} \frac{\alpha_j}{C_i} - \sum_{j=k+1}^{i-1} \frac{\gamma_j}{C_i} - \sum_{j=k+1}^{i-1} \sum_{m=1}^{j-1} \frac{\beta_{j,m}}{C_i} + \frac{\alpha_i}{C_i} - \frac{\gamma_i''}{C_i} - \frac{\beta_i}{C_i} \quad (i = k+2, k+3, \dots, n) \quad (16)$$

同理, 可将实际生产流程的钢比系数写为

$$\left. \begin{aligned} p_{si} &= p_{0i} + \Delta p_{si} \quad (i \neq k) \\ p_{sk} &= p_{0k} = 1, \quad \Delta p_{sk} = 0 \end{aligned} \right\} \quad (17)$$

4.2 实际生产流程物流对吨钢能耗的影响

在进行实际生产流程的吨钢能耗分析时,仍以基准物流图作为参照基准,得出实际吨钢能耗与基准吨钢能耗的差

$$\Delta E_s = E_s - E_{0s} = \sum_{i=1}^n (e_i p_{si} - e_{0i} p_{0i}) \quad (18)$$

将式(3)中的材比系数 p_{pi} 换为钢比系数 p_{si} ,并将式(14—16)代入式(18),整理后可得

$$\Delta E_s = \Delta e_{s1} + \Delta e_{sk} + \Delta e_{s(k+1)} + \Delta e_{s2} \quad (19)$$

式中, e_{s1} 和 Δe_{sk} 分别为连铸前各工序及连铸(或铸锭)工序物流引起的吨钢能耗的变化; $\Delta e_{s(k+1)}$ 和 Δe_{s2} 分别为连铸后第一道工序及连铸后各工序物流引起的吨钢能耗的变化。

$$\begin{aligned} \Delta e_{s1} = & \sum_{i=1}^{k-1} \left[\frac{e_{0i}}{C_i} \left(- \sum_{j=i+1}^k \alpha_j + \sum_{j=i+1}^k \gamma_j + \right. \right. \\ & \left. \left. \sum_{j=i+1}^k \sum_{m=1}^i \beta_{j,m} - \sum_{j=k+1}^n \sum_{m=i+1}^k \beta_{j,m} + \right. \right. \\ & \left. \left. \gamma_i'' + \beta_i \right) \right] \quad (20) \end{aligned}$$

$$\Delta e_{sk} = \frac{e_{0k}}{C_k} (\gamma_k'' + \beta_k) \quad (21)$$

$$\Delta e_{s(k+1)} = e_{0(k+1)} \frac{\alpha_{k+1}}{C_{k+1}} \quad (22)$$

$$\begin{aligned} \Delta e_{s2} = & \sum_{i=k+2}^n \left[\frac{e_{0i}}{C_i} \left(\sum_{j=k+1}^{i-1} \alpha_j - \sum_{j=k+1}^{i-1} \gamma_j - \right. \right. \\ & \left. \left. \sum_{j=k+1}^{i-1} \sum_{m=1}^{j-1} \beta_{j,m} + \alpha_i \right) \right] \quad (23) \end{aligned}$$

分析式(20—23)可以看出,物流对吨钢能耗的影响,在连铸工序前和连铸工序后是不一样的。连铸前各工序的钢比系数受其下游各工序物流的影响(改变 p_{si}),本道工序的物流只影响本道工序的工序能耗(改变 e_{0i}),最终它们共同影响吨钢能耗;连铸后各工序的钢比系数受其上游各工序物流的影响,本道工序的物流既影响本道工序的钢比系数又影响本道工序的工序能耗,最终本道工序生产的废品对吨钢能耗没有任何影响。这也正是吨钢能耗这一评价指标的缺陷所在。

根据式(20—23),参照式(12,13)可以很方便地得出各股物流及其增减 1 kg 对吨钢能耗影响量的计算公式,在此不再赘述。

5 物流对能耗影响分析的计算步骤及说明事项

5.1 计算步骤

(1) 收集实际生产流程的相关数据,弄清各股物流的来龙去脉。

(2) 将各流程各股物流的实物量乘以相应的铁含量,转换成为铁元素重量。

(3) 对各生产工序数据进行铁元素重量平衡校正,方法是用进入工序的铁元素重量减去离开工序的铁元素重量,不足部分记为生产损失项,它作为工序向外界输出物(γ_i'')的一部分参与物流对能耗影响的分析;盈余部分可以记录下来,但它不参与物流对能耗影响的分析。

(4) 以吨材为基准构筑实际生产流程的物流图,图中各股物流的数值等于各工序各股物流的铁元素重量除以最终工序合格产品的铁元素重量。

(5) 以吨钢为基准构筑实际生产流程的物流图,图中各股物流的数值等于各工序各股物流的铁元素重量除以连铸(或铸锭)工序合格连铸坯(或钢锭)的铁元素重量。

(6) 根据实际生产流程的物流图构筑基准物流图。

(7) 按照第 3、4 节给出的公式,计算物流对吨材能耗和吨钢能耗的影响。

5.2 说明事项

(1) 如果一个企业有多条生产流程或多种产品,那么需要按每一种产品的产量分摊该产品在各流程中每一道生产工序上的物料消耗量。

(2) 本文所给出的计算公式中,没有包括焦化、耐材及其它非含铁物料生产工序,但这并不影响本计算方法的正确性。实际计算时,可以通过含铁物料生产工序与这些工序之间的联系,把它们考虑进来。比如:焦化工序消耗情况就可以通过炼铁工序的焦比系数把它考虑进来。

(3) 对一个多流程的企业来说,用本方法计算出来的某流程各种物流对吨钢能耗和吨材能耗的影响,其数值量等于该股物流对企业吨钢能耗和吨材能耗的影响量;该数值在企业吨钢综合能耗和吨材能耗中所占的份额取决于计算流程中的钢产量和产品产量在企业钢产量和该种产品产量中所占的份额。

6 结论

(1) 从基准物流图的概念入手,给出了实际生产流程中含铁物料流对吨材能耗和吨钢能耗影响的计算公式。

(2) 各生产企业应在有条件的情况下,尽可能分析几种主要产品的吨材能耗,以找出生产中存在的问题,为进一步节能、降耗、降低成本指明途径。

参考文献

- [1] Lu Z W. *Energy Metall Ind*, 1992; 11(1): 1
(陆钟武, 冶金能源, 1992; 11(1): 1)
- [2] Lu Z W, Zhai Q G, Meng Q S. *Iron Steel*, 1997; 32(5): 69
(陆钟武, 翟庆国, 孟庆生, 钢铁, 1997; 32(5): 69)
- [3] Lu Z W, Cai J J, Yu Q B, Xie A G. In: *Report of the Analysis and Integration on Steel Manufacturing Process*, 1999: 51
(陆钟武, 蔡九菊, 于庆波, 谢安国, 见: 钢铁制造流程的解析与集成报告摘要与汇编, 1999: 51)