

复合流程工业中物流对能耗影响的分析模型

刘丽孺¹, 陆钟武², 张红福³

(1. 广东工业大学 建设学院, 广州 510006;
2. 东北大学 材料与冶金学院, 沈阳 110004;
3. 广州粤能电力科技开发有限公司, 广州 510075)

摘要: 以基准物流图研究法为基础, 建立一种能够分析复合流程工业中物流对能耗的影响分析模型。并以某氧化铝厂 1999 年生产数据为依据, 采用该模型分析复合流程中偏离基准物流图的各股物流(包括从外界输入的物流 α 、回收进行再处理的不合格产品或副产品 β 以及向外界输出物流 γ)对折合比、工序能耗和最终产品综合能耗的影响。

关键词: 复合流程; 能耗; 物流; 流程工业

中图分类号: TF 4

文献标识码: A

Model for analyzing effect of material flows on energy intensity in complex process industries

LIU Li-ru¹, LU Zhong-wu², ZHANG Hong-fu³

(1. Institute of Construction, Guangdong University of Technology, Guangzhou 510006, China;
2. School of Materials and Metallurgy, Northeastern University, Shenyang 110004, China;
3. Yueneng Power Technology Co. Ltd., Guangzhou 510075, China)

Abstract: Based on the method of standard material flow diagram (SMFD), a model for analyzing the effect of material flows on the energy intensity in complex process industries was established. Based on the statistical data from an alumina refinery plant in 1999 with Bayer complex process, the effect of each material flows deviating from SMFD (including input material from surrounding α , recycle unqualified and waste product for retreatment β and output wastes to the surrounding γ) on the product ratio, unit process energy intensity and energy intensity of the final product in complex process industries can be analyzed clearly using this model.

Key words: complex process; energy intensity; material flows; process industry

流程工业都有一个共同特点, 那就是从天然原料开始到最终产品的生产, 中间要经过多道生产工序, 每道工序的产品都是下道工序的主要原料, 最后一道工序的产品除外, 该道工序生产最终产品。一般流程工业的生产过程, 涉及到流程长、工序多、物流复杂、能耗高。其中, 复杂的物流对能耗有重要的影响, 已引起广泛重视。HYMAN 和 REED^[1]开发针对流程工

业物流和能流的校对模型, 并将其应用到造纸工业^[2-4]和钢铁工业^[5-7]。陆钟武等^[8]和于庆波等^[9-10]提出了基准物流图的研究方法, 并用该法定量分析钢铁生产流程中物流与综合能耗的关系。最近, 该方法被拓展应用到氧化铝生产中, 定量分析氧化铝生产流程中物流对能耗的影响^[11-13]。

但上述物流对能耗影响的分析方法都是以串联流

程为基础。实际上,许多流程工业的具体生产流程中各工序之间的关系既有串联、又有并联,是一种复合流程。如某混联法氧化铝生产流程,并联的拜耳法与烧结法工艺都生产出氢氧化铝,最后氢氧化铝工序经过焙烧工序生产出氧化铝。本文作者以基准物流图研究法为基础,建立一种能够分析复合流程工业中物流对能耗影响的分析模型。

1 模型的建立

1.1 复合生产流程的基准物流图

为了使分析模型简单易懂,选择某简单的复合流程为例来加以说明。该流程共有 n 道生产工序,并且各工序之间既有并联又有串联,其中两并联流程的生产比例分别为 ϕ_1 和 ϕ_2 ($\phi_1+\phi_2=1$)。根据“全封闭单行道”式基准物流图的概念^[8, 11]: 1) 全流程中含最终产品元素的物料的惟一流向是从上游工序流向下游工序; 2) 在流程的中途,没有含最终产品元素的物料的输入和输出。同时,又能满足以上两个条件,并以单位最终产品为基础的物流图,叫做基准物流图。根据该定义,绘制某复合流程的基准物流图如图1所示。

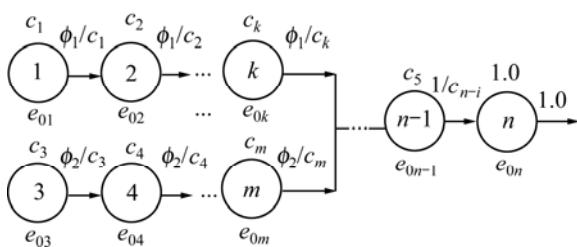


图1 某复合流程的基准物流图

Fig.1 Standard materials flow diagram of complex process

图1中每个圆圈代表一道工序,圆圈上方所标的 c_1 、 c_2 、...、 c_n 是各工序产品中最终产品元素的含量,第 n 道工序产出的是最终产品,设 $c_n=1$ 。圆圈下方所标的 e_{01} 、 e_{02} 、...、 e_{0n} 是各工序的基准工序能耗。在每个箭头上方所标的 ϕ_1/c_1 、 ϕ_1/c_2 、...、 ϕ_1/c_n 是各工序的基准折合比,并记作 p_{01} 、 p_{02} 、...、 p_{0n} 。

根据该基准物流图,采用e-p分析法^[14-15]可求得该复合流程的单位最终产品的综合能耗 E_0 (简称基准能耗)为

$$E_0 = \frac{\phi_1}{c_1} e_{01} + \frac{\phi_1}{c_2} e_{02} + \cdots + \frac{\phi_2}{c_3} e_{03} + \frac{\phi_2}{c_4} e_{04} + \cdots + \frac{1}{c_{n-1}} e_{0n} + e_{0n} = p_{01} e_{01} + p_{02} e_{02} + \cdots +$$

$$p_{03} e_{03} + p_{04} e_{04} + \cdots + p_{0n-1} e_{0n-1} + e_{0n} \quad (1)$$

式(1)是同各种物流状况下实际流程的能耗值进行对比的基准。

1.2 流程工业生产实际物流图

实际流程工业生产的物流情况是十分复杂的。对任何一个生产工序 i 来说,它都可能会有如下的6种物流,其流程图如图2所示^[8, 13]。图中所有物流的量,都指的是含有最终产品元素的量。

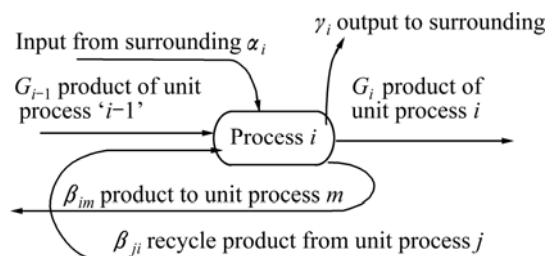


图2 物料在工序中的流动示意图

Fig.2 Material flows diagram of unit process

上述的6股物流,满足如下最终产品的质量平衡关系:

$$G_{i-1} + \alpha_i + \beta_{j,i} = G_i + \gamma_i + \beta_{i,m} \quad (m < i < j) \quad (2)$$

可见,有3种偏离基准物图的物流,即从外界输入的物流(α)、回收进行再处理的不合格产品或副产品(β)以及向外界输出物流(γ)。根据以前的分析可知^[8-13]:

1) 从外界向某工序输入含最终产品元素的物料(α 物流)可以降低其上游各工序的折合比,从而降低最终产品的能耗,且越是后部工序,降低能耗越多。

2) 从任何工序向外界输出含最终产品元素的物料(γ 物流)增加该工序的工序能耗和其上游各道工序的折合比,从而增加最终产品的能耗,且越是后部工序,耗能越多。

3) 从任何工序回收含最终产品元素的物料到上游工序进行再处理(β 物流),增加该工序的工序能耗和该工序与上游接受物料的工序之间各工序的折合比,从而增加最终产品的能耗,而且越是后部工序,循环的距离越长,耗能越多。

1.3 复合流程中物流对能耗的影响分析模型

更一般地,假设在实际生产中,采用 f 个并联流程来生产最终产品。假设每个流程的生产比例为 ϕ_f ($\sum_f \phi_f = 1$),那么图1中每道工序的基准折合比 p_{0i}

和基准工序能耗 e_{0i} 分别为

$$p_{0i} = \frac{\phi_f}{c_i} \quad (3)$$

$$e_{0i} = \frac{p_i}{p_i + \gamma_i / c_i + \beta_{im} / c_i} e_i \quad (i=1, 2, \dots, n) \quad (4)$$

式中： p_i 和 e_i 为工序 i 的实际折合比和工序能耗，它们可直接由生产统计数据计算出来。

综合以前物流对能耗的影响结果^[8-13]可知，各物流对工序 i 折合比的影响量 Δp_i ($i=1, 2, \dots, n$) 为

$$\begin{aligned} \Delta p_i &= p_i - p_{0i} = - \sum_{j=i+1}^n \frac{\phi_{i\alpha_j} \alpha_j}{c_i} + \sum_{j=i+1}^n \frac{\phi_{i\gamma_j} \gamma_j}{c_i} + \\ &\quad \sum_{j=i+1}^n \sum_{m=1}^i \frac{\phi_{i\beta_{jm}} \beta_{jm}}{c_i} \quad (m < i < j) \end{aligned} \quad (5)$$

物流对工序能耗的影响 Δe_i 为

$$\Delta e_i = e_i - e_{0i} = \frac{\gamma_i}{c_i p_i} e_{0i} + \frac{\beta_{im}}{c_i p_i} e_{0i} \quad (i=1, 2, \dots, n) \quad (6)$$

物流对综合能耗的影响量 ΔE 为

$$\begin{aligned} \Delta E &= \sum_{i=1}^n \left[\frac{e_{0i}}{c_i} \left(- \sum_{j=i+1}^n \phi_{i\alpha_j} \alpha_j + \sum_{j=i+1}^n \phi_{i\gamma_j} \gamma_j + \right. \right. \\ &\quad \left. \left. \sum_{j=i+1}^n \sum_{m=1}^i \phi_{i\beta_{jm}} \beta_{jm} + \gamma_i + \beta_{im} \right) \right] \end{aligned} \quad (7)$$

式中： ϕ_{ih} ($h=\alpha_j, \beta_j, \gamma_j$) 是物流 h 相对于工序 i 的分配比例。当物流 h 与工序 i 同属一个并联流程，则 $\phi_{ih}=1$ ；当物流 h 与工序 i 不在同一个并联流程，则 $\phi_{ih}=0$ ；当物流 h 在合并的流程中，而工序 i 在其中一个并联流程中，则 $\phi_{ih}=\phi_f$ 。

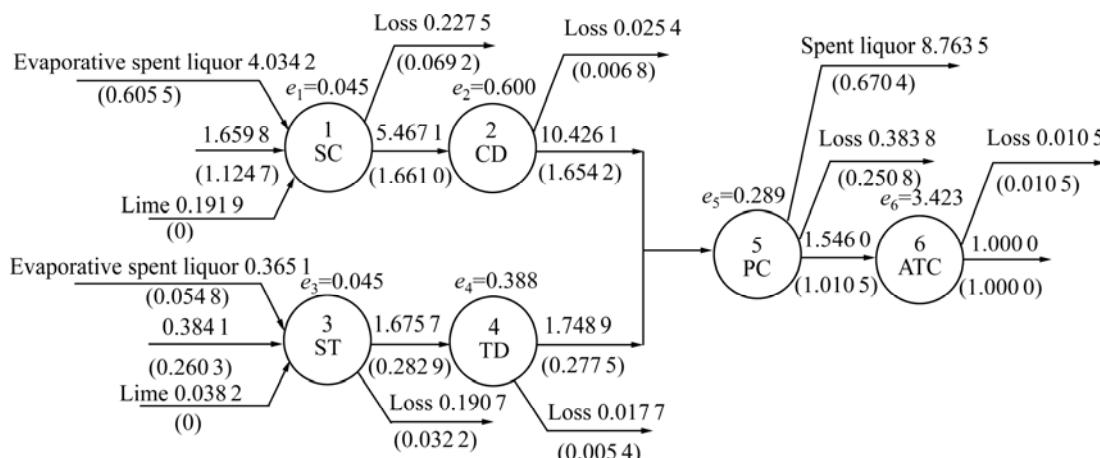


图3 拜耳法氧化铝生产流程的实际物流图

Fig.3 PMFD for Bayer alumina refinery process (based on 1 t alumina)

2 应用实例

2.1 物流图

做为文献[11]的完善和补充，下面仍以文献[11]中某拜耳法生产氧化铝的流程中物流对能耗的影响实例^[9]来详细说明所建立复合流程工业中物流对能耗的影响分析模型的实际应用。根据该氧化铝厂拜耳法部分生产流程 1999 年的统计数据，构筑该工艺的实际物流图(Practical material flows diagram, PMFD)(见图 3)。该流程是一典型的复合流程，主要由压煮矿浆的制备(Slurry preparation for caldron digestion, SC)、压煮溶出(Caldron digestion, CD)、管道化矿浆的制备(Slurry preparation for tube digestion, ST)、管道化溶出(Tube digestion, TD)、种分(Seed precipitation, PC)、Al(OH)₃焙烧(ATC)等 6 道生产工序组成。在总产量中，压煮溶出占 85.63%，管道化溶出占 14.37%。每道工序的产品产量、工序能耗和工序产品的组份分析等数据，都可由统计数据获得。

在图 3 中，在每个箭头上标明了各股物流的折合比，并在括号中注明了与之相当的氧化铝重量。图 4 所示为根据图 3 构筑出来的与之相对应的基准物流图(SMFD)。

图 3 中，箭头下方括号中的数据是各工序产品的氧化铝含量，可直接由统计数据获得。根据式(3)和(4)可得出每道工序产品的折合比和工序能耗，分别标注在图中的箭头上方和圆圈上方。以管道化溶出工序为例，它属于管道化溶出并联流程，其产量占 14.37%，则该道工序产品的折合比和工序能耗计算如下：

$$p_{04} = \frac{\phi_f}{c_4} = \frac{14.37\%}{0.1587} = 0.9054 \text{ m}^3 (1 \text{ t Al}_2\text{O}_3)$$

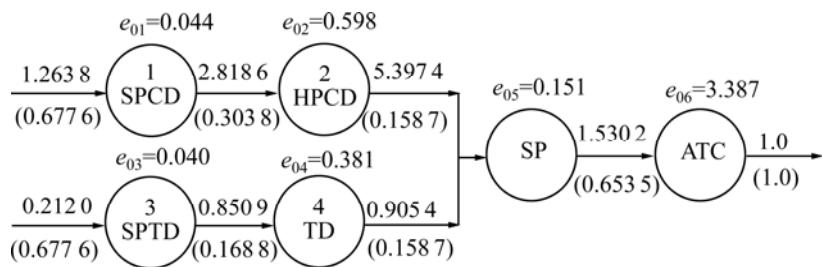


图4 拜耳法氧化铝生产流程的基准物流图

Fig.4 SMFD for Bayer alumina refinery process based on 1 t alumina

表1 各股物流对折合比和工序能耗的影响

Table1 Effect of material flows on product ratio (PR) based on 1 t Al₂O₃ and unit process energy intensity (UPEI)

Item	SC		CD		ST		TD		PC		ATC	
	PR ⁽¹⁾ / m ³	UPEI ⁽¹⁾ / (MJ·m ⁻³)	PR ⁽¹⁾ / m ³	UPEI ⁽¹⁾ / (MJ·m ⁻³)	PR ⁽¹⁾ / m ³	UPEI ⁽¹⁾ / (MJ·m ⁻³)	PR ⁽¹⁾ / m ³	UPEI ⁽¹⁾ / (MJ·m ⁻³)	PR ⁽²⁾ / t	UPEI ⁽²⁾ / (MJ·t ⁻¹)	PR ⁽²⁾ / t	UPEI ⁽²⁾ / (MJ·t ⁻¹)
Loss from ATC	0.0296	—	0.0567	—	0.0089	—	0.0095	—	0.0161	—	—	36
Loss from PC	0.7069	—	1.3537	—	0.2134	—	0.2271	—	—	38	—	—
Spent liquor	1.8896	—	3.6184	—	0.5705	—	0.6070	—	—	100	—	—
Loss from CD	0.0224	—	—	2	—	—	—	—	—	—	—	—
Loss from SC	—	1	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
Loss from TD	—	—	—	—	0.0320	—	—	7	—	—	—	—
Loss from ST	—	—	—	—	—	5	—	—	—	—	—	—
Total	2.6484	1	5.0287	2	0.8248	5	0.8436	7	0.0161	138	0	36
Standard value	2.8186	44	5.3974	598	0.8509	40	0.9054	381	1.5302	151	1.0000	3387
Practical value	5.4670	45	10.4261	600	1.6757	45	1.7490	388	1.5463	289	1.0000	3423

1) For liquid product; 2) For solid product.

$$e_{04} = \frac{p_4}{p_4 + \gamma_4 / c_4 + \beta_{4m} / c_4} e_4 = \frac{1.7489}{1.7489 + 0.0054 \div 0.1587 + 0 \div 0.1587} \times 0.388 = 381 \text{ MJ/m}^3$$

2.2 每股物流对工序能耗和折合比的影响

每股物流对工序能耗和折合比的影响如表1所列。以管道化溶出工序为例来说明计算步骤。对于该道工序，只有溶出损失(0.0054)(见图3)对工序能耗有影响，而来自Al(OH)₃焙烧工序和种分工序的损失和循环的种分母液对该工序的折合比有影响。这3股物流相对于管道化溶出工序的分配比例为φ_{TD}(14.37%)。根据式(6)可计算出管道化溶出损失对管道化工序能耗的影响：

$$\Delta e_4 = e_4 - e_{04} = \frac{\gamma_4}{c_4 p_4} e_{04} = \frac{0.0054}{0.1587 \times 1.7490} \times 0.388 = 7 \text{ MJ/m}^3$$

根据式(5)可计算出焙烧损失0.0105(见图3)对管道化工序折合比的影响为

$$\Delta p_4 = p_4 - p_{04} = \frac{\phi_{CD} \gamma_6}{C_4} = \frac{14.37\% \times 0.0105}{0.1587} = 0.0095 \text{ m}^3 (1 \text{ t Al}_2\text{O}_3)$$

采用相同的计算过程可计算出其它物流对工序能耗和折合比的影响。对每个单元工序，实际折合比和基准折合比之间的差值正好等于各股物流对折合比影响量的合计值。工序能耗也满足这样的关系。

2.3 各股物流的单位增减量对能耗的影响

各股物流的单位增减量(对液体为0.01 m³，对固体为1 kg)对能耗的影响如表2所列。

表2 各股物流的单位增减量对能耗的影响

Table 2 Effect of unit increment of material flows quantity on energy intensity

Item	Loss of ATC	Loss of PC	Spent liquor	Loss of CD	Loss of SC	Loss of TD	Loss of ST
Quantity/MJ	7.3	2.6	3.0	1.0	0.4	0.8	0.4

0.01 m³ for liquid product, 1 kg for solid product.

用焙烧损失这股物流为例来说明计算步骤。 $\gamma_6 = 0.0105 \text{ t}$ (见图3), 对工序1和2, $\phi_{i\gamma_6} = \phi_{CD} = 85.63\%$; 对工序3和4, $\phi_{i\gamma_6} = \phi_{TD} = 14.37\%$; 对工序5和6, $\phi_{i\gamma_6} = 100\%$ 。根据式(7)可计算出物流 γ_6 对综合能耗的影响 ΔE :

$$\Delta E = \sum_{i=1}^6 \left[\frac{e_{0i}}{c_i} (\phi_{i\gamma_6} \gamma_6) \right] = \gamma_6 \times 85.63\% \times \left(\frac{e_{01}}{c_1} + \frac{e_{02}}{c_2} \right) + \gamma_6 \times 14.37\% \times \left(\frac{e_{03}}{c_3} + \frac{e_{04}}{c_4} \right) + \gamma_6 \left(\frac{e_{05}}{c_5} + \frac{e_{06}}{c_6} \right) = 0.077$$

那么, γ_6 的单位增量对综合能耗的影响为

$$\frac{\Delta E}{1000\gamma_6} = \frac{0.077}{1000 \times 0.0105} = 7.3 \text{ MJ/kg}$$

采用相同的计算过程可计算出表2中其它数值。

各道工序的损失均使吨氧化铝能耗增加, 且越是后序工序, 能耗越大。

可见, 采用本研究所建立的分析模型分析复合流程中各股物流对折合比、工序能耗、最终产品的综合能耗的影响。

3 结论

1) 以基准物流图研究法为基础, 构建复合流程的基准物流图, 建立一种能够分析复合流程工业中物流对能耗的影响分析模型。采用该模型可清楚地分析复合流程中偏离基准物流图的各股物流对折合比、工序能耗、最终产品综合能耗的影响。

2) 作为具体的应用实例, 以某氧化铝厂1999年生产数据为依据, 用该模型定量分析该厂拜耳法生产氧化铝的复合流程中, 各股物流对折合比、工序能耗、吨氧化铝综合能耗的影响。

REFERENCES

- [1] HYMAN B, REED T. Energy intensity of manufacturing processes[J]. Energy, 1995, 20(7): 593–606.
- [2] GIRALDO L, HYMAN B. Energy end-use models for pulp, paper, and paperboard mills[J]. Energy, 1995, 20(10):

- 1005–1019.
- [3] GIRALDO L, HYMAN B. An energy process-step model for manufacturing paper and paperboard[J]. Energy, 1996, 21(7/8): 667–681.
- [4] HYMAN B, ROOP J M. A simulation of energy utilization and technological change in the pulp and paper industry[C]// Proceedings of the 1996 IMECE Symposium on Thermodynamics and the Design, Analysis, and Improvement of Energy Systems. New York: American Society of Mechanical Engineers, 1996.
- [5] ANDERSEN J P. Energy and material consumption patterns in the U.S. steel industry[D]. Seattle (WA): University of Washington, 1998.
- [6] ANDERSEN J P, HYMAN B. Energy and material flow models for the U.S. steel industry[J]. Energy, 2001, 26(2): 137–159.
- [7] COSTA M M, SCHAEFFE R, WORRELL E. Energy accounting of energy and materials flows in steel production systems[J]. Energy, 2001, 26(5): 363–384.
- [8] 陆钟武, 蔡九菊, 于庆波. 钢铁生产流程的物流对能耗的影响[J]. 金属学报, 36(4): 370–378.
LU Zhong-wu, CAI Jiu-ju, YU Qing-bo. Study on the influence of material flows on energy intensity of steel manufacturing process[J]. Acta Metallurgica Sinica, 2000, 36(4): 370–378.
- [9] 于庆波, 陆钟武, 蔡九菊. 钢铁生产流程中物流对能耗影响的计算方法[J]. 金属学报, 2000, 36(4): 379–382.
YU Qing-bo, LU Zhong-wu, CAI Jiu-ju. Study on the method for calculating effect of material flows on energy intensity in steel manufacturing process[J]. Acta Metallurgica Sinica, 2000, 36(4): 379–382.
- [10] 于庆波, 陆钟武, 蔡九菊. 钢铁生产流程的物流对能耗影响的表格分析法[J]. 东北大学学报, 2001, 22(1): 71–74.
YU Qing-bo, LU Zhong-wu, CAI Jiu-ju. The calculating form of effect of material flows on energy intensity in steel manufacturing process[J]. Journal of Northeastern University, 2001, 22(1): 71–74.
- [11] 刘丽孺, 陆钟武, 于庆波, 闫书明, 姜玉敬, 吕子剑. 拜耳法生产氧化铝流程的物流对能耗的影响[J]. 中国有色金属学报, 2003, 13(1): 265–270.
LIU Li-ru, LU Zhong-wu, YU Qing-bo, YAN Shu-ming, JIANG Yu-jin, LÜ Zi-jian. Influence of material flow in alumina manufacturing process with Bayer method on its energy intensity[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2003, 13(1): 265–270.

- [12] 刘丽孺, 陆钟武, 于庆波, 姜玉敬. 烧结法生产氧化铝流程中物流对能耗的影响[J]. 有色金属(冶炼部分), 2003, 55(2): 51–54.
LIU Li-ru, LU Zhong-wu, YU Qing-bo, JIANG Yu-jin. Influence of material flow in alumina manufacturing process with sinter method on its energy intensity[J]. Nonferrous Metals, 2003, 55(2): 51–54.
- [13] 刘丽孺, 陆钟武, 于庆波, 姜玉敬. 拜耳-烧结混联法生产氧化铝流程中物流对能耗的影响[J]. 东北大学学报, 2002, 23(10): 944–947.
LIU Li-ru, LU Zhong-wu, YU Qing-bo, JIANG Yu-jin. Influence of material flow in alumina manufacturing process with Bay-sinter combined method on its energy intensity[J]. Journal of Northeastern University, 2002, 23(10): 944–947.
- [14] LIU Li-ru, LU Aye, LU Zhong-wu. Analysis of the overall energy intensity of alumina refinery process using unit process energy intensity and product ratio method[J]. Energy, 2006, 31(8/9): 1167–1176.
- [15] 刘丽孺, 陆钟武, 于庆波, 闫书明, 姜玉敬, 吕子剑. 氧化铝综合能耗的 e-p 分析[J]. 中国有色金属学报, 2002, 12(6): 1294–1298.
LIU Li-ru, LU Zhong-wu, YU Qin-bo, YAN Shu-ming, JIANG Yu-jin, LÜ Zi-jian. e-p analysis of the overall energy intensity of alumina production[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2002, 12(6): 1294–1298.

(编辑 李艳红)