

拜耳法生产氧化铝流程的物流对能耗的影响^①

刘丽孺^{1, 2}, 陆钟武¹, 于庆波¹, 闫书明¹, 姜玉敬³, 吕子剑³

(1. 东北大学 材料与冶金学院, 沈阳 110004; 2. 沈阳建筑工程学院 环境系, 沈阳 110015;

3. 中国长城铝业公司, 郑州 450041)

摘 要: 以氧化铝生产流程的基准物流图概念为基础, 构筑了拜耳法生产氧化铝流程的基准物流图, 为定量分析拜耳法流程中物流对能耗的影响提供了一个比较的基准, 并以某拜耳法氧化铝厂生产数据为依据, 绘制了该厂的实际物流图, 构筑了与其相对应的基准物流图。用基准物流图法定量地分析了各个工序的工序能耗变化和折合比变化对氧化铝综合能耗的影响, 以及生产流程中物流对能耗的影响, 为指导该厂今后的节能降耗工作提供了定量的依据。

关键词: 氧化铝; 拜耳法; 基准物流图; 实际物流图; 综合能耗; 工序能耗

中图分类号: TF 821

文献标识码: A

在氧化铝生产流程中, 物流对能耗、成本、投资及环境等各项生产技术经济指标都有很重要的影响。但由于没有比较基准, 无法进行定量分析, 所以长期以来还一直停留在定性分析阶段。

为了便于分析氧化铝生产流程中物流对能耗的影响, 文献[1]从含氧化铝物料平衡入手, 设计了符合如下 2 个条件的“全封闭单行道”式的氧化铝生产流程物流图: 一是全流程中含氧化铝物料的唯一流向是从上游工序流向下游工序; 二是在流程的中途, 没有含氧化铝物料的输出、输入。能同时满足以上 2 个条件, 且以 1 t 氧化铝为最终产品的物流图, 叫做氧化铝生产流程的基准物流图。在此基础上, 构筑了混联法生产流程的基准物流图, 并用基准物流图法定量地分析了该流程中物流对能耗的影响。由于拜耳法流程与混联法流程有很大的不同, 所以作者将用“基准物流图”研究法, 来定量分析拜耳法流程中物流对能耗的影响。

1 拜耳法生产流程的基准物流图

近年来, 为了降低溶出工序的能耗, 某些老厂先后用管道化溶出工艺来取代部分压煮溶出工艺, 以达到降低溶出工序能耗的目的。设实际拜耳法流程中, 压煮溶出和管道化溶出的生产比例分别为 a_1 , a_2 ($a_1 + a_2 = 1$), 则根据氧化铝生产流程基准

物流图的概念^[1], 可绘出拜耳法流程的基准物流图, 如图 1 所示。

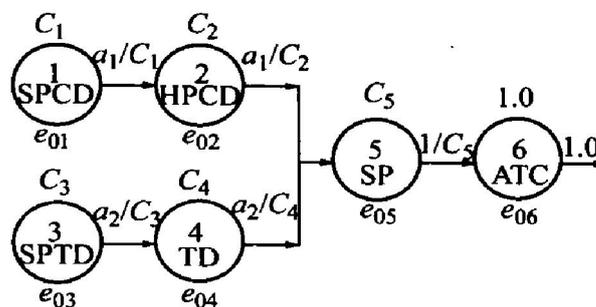


图 1 拜耳法流程的基准物流图

Fig. 1 Standard materials flow diagram of Bayer process

(SPCD—Slurry preparation for high pressure caldron digestion; HPCD—High pressure caldron digestion; SPTD—Slurry preparation for tube digestion; TD—Tube digestion; SP—Seed precipitation; ATC—Aluminium trihydrate calcining)

图 1 中每个圆圈代表一道工序, 圆圈上方所标的 C_1, C_2, \dots, C_5 是各工序产品中氧化铝的含量 (对固体物料是质量分数, 对液体物料是 t/m^3), 第 6 道工序产出的是氧化铝, 设 $C_6 = 1$; 圆圈下方所标的 $e_{01}, e_{02}, \dots, e_{06}$ 是各工序合格产品的基准工序能耗, GJ/t (或 GJ/m^3); 图中箭头表示含氧化铝物料的流向, 在每个箭头上所标的 $a_1/C_1, a_1/C_2, \dots, 1/C_5$ 是各工序的实物产量与氧化铝产量

① 基金项目: 国家重点基础研究发展规划资助项目(G2000026300)

收稿日期: 2001 - 12 - 07; 修订日期: 2002 - 04 - 19

作者简介: 刘丽孺(1971 -), 女, 博士研究生。

通讯联系人: 刘丽孺, 讲师, 博士研究生, 东北大学 345 信箱, 电话: 024-23900492;

E-mail: cyookoohuku@sina.com

之比, 称其为基准折合比, 并记作 $p_{01}, p_{02}, \dots, p_{05}$ (固体物料为 t/t; 液体物料为 m^3/t)。一般拜耳法生产氧化铝能耗的统计范围包括: 石灰煅烧、原料制备、压煮溶出、管道化溶出、种分、焙烧和蒸发等 7 道生产工序, 但实际上, 石灰煅烧和蒸发 2 道工序是氧化铝生产的辅助工序, 所以在拜耳法流程的基准物流图中不包括这 2 道工序。下面的氧化铝基准能耗, 主要是指氧化铝主工序能耗, 均不包括这 2 道工序。

根据该基准物流图, 可求得拜耳法流程的每吨氧化铝能耗 E_0 (简称每吨氧化铝基准能耗) 为

$$E_0 = \frac{a_1}{C_1} e_{01} + \frac{a_1}{C_2} e_{02} + \frac{a_2}{C_3} e_{03} + \frac{a_2}{C_4} e_{04} + \frac{1}{C_5} e_{05} + e_{06}$$

$$= p_{01} e_{01} + p_{02} e_{02} + p_{03} e_{03} + p_{04} e_{04} + p_{05} e_{05} + e_{06} \quad (1)$$

式(1)是同各种物流状况下拜耳法流程的能耗值进行对比的基准。

2 拜耳法氧化铝生产流程的实际物流图及其能耗分析

实际拜耳法氧化铝生产流程的物流不可能满足基准物流图中提到的 2 个假设条件, 实际流程中含氧化铝物料的流动情况是十分复杂的^[1]。运用基准物流图进行能耗分析工作, 大致可按以下 3 步进行:

1) 以某厂氧化铝生产流程为对象, 收集统计期内有关的物流和能耗数据, 弄清各股物流的来龙去脉, 以 1 t 氧化铝为计算基准, 绘制该流程的实际物流图。

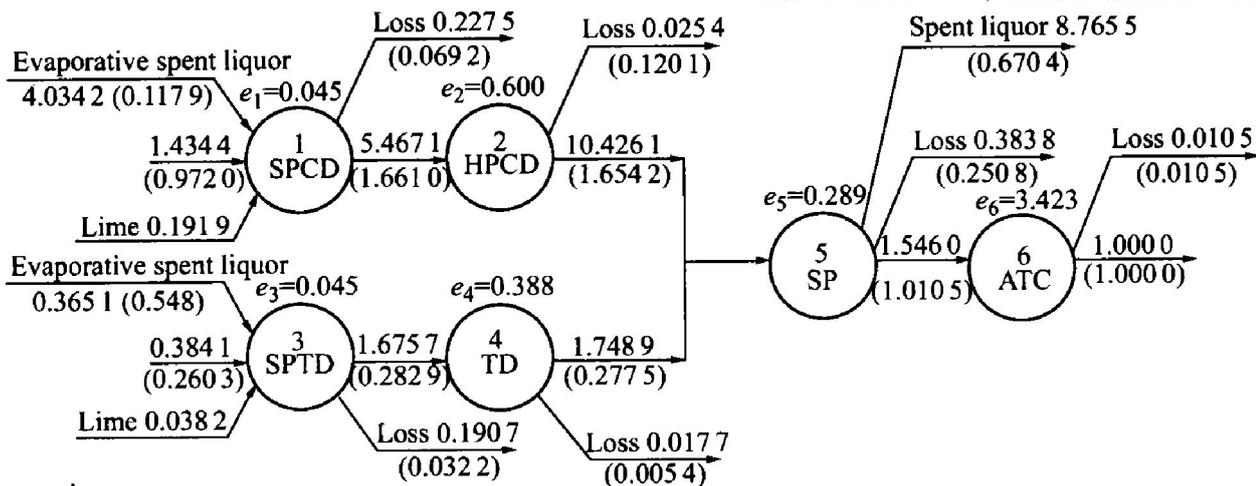


图 2 某厂生产流程的实际物流图

Fig. 2 Real materials flow diagram for manufacturing process (based on per ton alumina)

2) 以实际物流图为依据, 构筑生产流程的基准物流图。

3) 对照基准物流图, 分析实际物流对能耗的影响。

对照基准物流图, 分析物流对能耗的影响, 就是要定量地确定偏离基准物流图的各股物流对折合比、工序能耗以及每吨氧化铝能耗的影响。具体的分析方法可参考文献[1~ 6]。

3 拜耳法流程中物流对能耗影响的分析实例

下面以某工厂为对象, 具体分析拜耳法生产氧化铝流程的物流对能耗的影响。该厂的主要生产流程由石灰煅烧、原料制备、压煮溶出、管道化溶出、种分、蒸发、焙烧等 7 道生产工序组成。

3.1 物流图

图 2 所示是以 1 t 氧化铝为最终产品, 按该厂某年度的平均生产数据绘制出的实际物流图。在总产量中, 压煮溶出占 85.63%, 管道化溶出占 14.37%。

图 2 中在圆圈上方标明了各道工序的工序能耗; 在每个箭头上标明了各股物流的折合比(括号外的数据), 并在括号中注明了与之相当的氧化铝质量。图 3 所示是根据图 2 构筑出来的与之相对应的基准物流图。图 3 中圆圈上方标明的是各工序的基准工序能耗; 箭头上方注明的是各股物流的折合比; 箭头下方注明的是各工序产品的氧化铝含量。

3.2 能耗计算和分析

3.2.1 压煮溶出和管道化溶出生产氧化铝的能耗比较

在实际物流图中, 通过矿浆制备工序所消耗

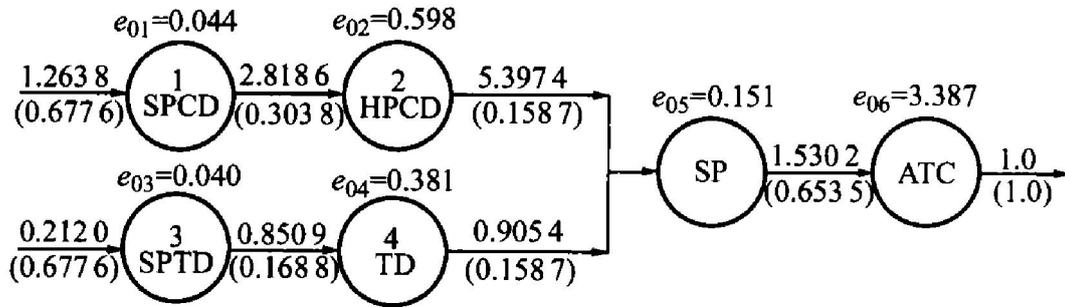


图 3 某厂生产流程的基准物流图

Fig. 3 Standard materials flow diagram for manufacturing process

的蒸发母液和石灰量, 可间接地将石灰煅烧和蒸发 2 道辅助工序联系进来。这样, 根据实际物流图中各工序能耗和折合比的数值, 可分别计算出用压煮溶出工艺和管道化溶出工艺生产 1 t 氧化铝的能耗 E_1 和 E_2 (包括石灰煅烧和蒸发 2 道辅助工序在内的所有工序):

$$E_1 = (e_{1p1} + e_{2p2} + e_{7p71} + e_{8p81}) / 85.63\% + e_{5p5} + e_{6p6} = (0.045 \times 5.4671 + 0.600 \times 10.4261 + 2.249 \times 4.0342 + 6.186 \times 0.1919) / 85.63\% + 0.289 \times 1.546 + 3.423 \times 1.0 = 23.453 \text{ GJ/t}$$

$$E_2 = (e_{1p1} + e_{2p2} + e_{7p72} + e_{8p82}) / 14.37\% + e_{5p5} + e_{6p6} = (0.045 \times 1.6757 + 0.388 \times 1.7489 + 2.249 \times 0.3651 + 6.186 \times 0.0382) / 14.37\% + 0.289 \times 1.546 + 3.423 \times 1.0 = 16.518 \text{ GJ/t}$$

式中 e_7 指以蒸发母液为蒸发工序的产品而统计的蒸发工序能耗, GJ/m^3 ; p_{71} , p_{72} 分别指压煮溶出和管道化溶出所消耗的蒸发母液; e_8 指以石灰为石灰煅烧工序的产品而统计的石灰煅烧工序能耗, GJ/t ; p_{81} , p_{82} 分别指压煮溶出和管道化溶出所消耗的石灰量; 85.63% 和 14.37% 分别指总产量中压煮溶出和管道化溶出所占的比例。

可见, 为了生产 1 t 氧化铝, 用压煮溶出要比用管道化溶出多耗能 6.935 GJ。所以, 为了降低每吨氧化铝能耗, 应尽可能增加管道化溶出的比例, 降低压煮溶出的比例。

3.2.2 每吨氧化铝基准能耗与实际能耗的计算和对比

由图 3 可以看出, 基准物流图中不包括石灰煅烧和蒸发 2 道工序, 为了将每吨氧化铝实际能耗与基准能耗进行对比, 下面所计算的每吨氧化铝实际

能耗和基准能耗均不包括这 2 道工序。

根据图 2 可求得该流程的每吨氧化铝实际能耗 E_s :

$$E_s = 0.045 \times 5.4671 + 0.600 \times 10.4261 + 0.045 \times 1.6757 + 0.388 \times 1.7489 + 0.289 \times 1.546 + 3.423 \times 1.0 = 11.133 \text{ GJ/t}$$

根据图 3 可求得该流程的每吨氧化铝基准能耗 E_0 :

$$E_0 = 0.044 \times 2.8186 + 0.598 \times 5.3974 + 0.040 \times 0.8509 + 0.381 \times 0.9054 + 0.151 \times 1.5302 + 3.387 \times 1.0 = 7.347 \text{ GJ/t}$$

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和折合比的差值, 不难求得它们各自对能耗的影响量(见表 1)。

由表 1 可见, 该厂每吨氧化铝实际能耗比基准能耗高出 3.784 GJ/t。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 0.305 GJ/t, 占增量的 8.06%, 且增量最大的工序是种分工序, 占增量的 69.89%; 因折合比的差值而引起的能耗增量为 3.479 GJ/t, 占增量的 91.94%, 增量最大的工序是压煮溶出工序, 占增量的 86.43%。

3.2.3 每股物流对工序能耗和折合比的影响

影响各工序的工序能耗和折合比的物流共有 7 股。这些股物流对折合比和工序能耗的影响列于表 2。该表列出了各股物流对折合比和工序能耗的影响量。基准折合比加上各股物流对折合比的影响总量, 正好等于实际折合比。工序能耗也满足这样的关系。

由表 2 可见, 这些股物流, 有的只影响工序能耗, 如矿浆制备损失, 只增加该道工序的工序能耗; 有的既影响工序能耗又影响折合比, 如焙烧损失, 既增加了焙烧工序的工序能耗, 又增加了其前

面各道工序的折合比。

3.2.4 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)对能耗的影响列于表 3。

由表 3 可见, 各道工序的损失均使氧化铝能耗增加, 且越是后部工序, 耗能越多, 如焙烧工序的损失每增加 1 kg, 将会使每吨氧化铝能耗上升 0.0073 GJ。原料制备损失, 主要是机械损失, 应加

强管理以降低该项损失; 对于焙烧损失, 主要是通过焙烧窑窑尾的烟气带走的, 应选择高效的除尘设备对物料加以回收; 对于进入种分母液中的氧化铝和溶出损失, 主要是化学损失, 应注重推进技术进步以提高分解率和溶出率, 以减少进入循环母液和赤泥中的氧化铝量。各种化学损失, 归根结底是由于原料中的 SiO₂ 含量过高, 所以还应注意采用合适的选矿方法来提高矿石的品位^[7~10]。

表 1 某厂每吨氧化铝基准能耗与实际能耗的对比

Table 1 Comparison between standard and practical energy intensity of per ton alumina (GJ/t)

Item	SPTD	TD	SPCD	HPCD	SP	ATC	Total
E_0	0.035	0.345	0.123	3.227	0.232	3.387	7.347
E_s	0.076	0.679	0.248	6.260	0.447	3.423	11.133
$E_s - E_0$	0.041	0.334	0.125	3.033	0.215	0.036	3.784
Due to difference of process energy intensity	0.007	0.013	0.010	0.026	0.213	0.036	0.305
Due to difference of product ratios	0.034	0.321	0.115	3.007	0.002	0	3.479

表 2 各股物流对折合比和工序能耗的影响

Table 2 Influence of materials flow on alumina process product ratios and process energy intensity

Item	SPTD		TD		SPCD		HPCD		SP		ATC	
	PR	UPEI	PR	UPEI	PR	UPEI	PR	UPEI	PR	UPEI	PR	UPEI
Loss from ATC	0.008 9		0.009 5		0.029 6		0.056 7		0.016 1		0.036	
Loss from SP	0.213 4		0.227 1		0.706 9		1.353 7		0.038			
Spent liquor	0.570 5		0.607 0		1.889 6		3.618 4		0.100			
Loss from HPCD					0.022 4		0.002					
Loss from SPCD						0.001						
Loss from TD	0.032 0		0.007									
Loss from SPTD		0.005										
Total	0.824 8	0.005	0.843 6	0.007	2.648 4	0.001	5.028 7	0.002	0.016 1	0.138	0.000 0	0.036
Standard value	0.850 9	0.040	0.905 4	0.381	2.818 6	0.044	5.397 4	0.598	1.530 2	0.151	1.000 0	3.387
Practical value	1.675 7	0.045	1.749 0	0.388	5.467 0	0.045	10.426 1	0.600	1.546 3	0.289	1.000 0	3.423

PR—Product ratio; UPEI—Unit process energy intensity.

表 3 各股物流的单位增减量对能耗的影响

Table 3 Influence of unit increment of materials flow quantity on energy intensity (GJ/t)

Loss of SPTD	Loss of ATC	Loss of SP	Spent liquor	Loss of HPCD	Loss of SPCD	Loss of TD
0.000 4	0.007 3	0.002 6	0.003 0	0.001 0	0.000 4	0.000 8

4 结论

1) 依据氧化铝生产流程基准物流图的概念, 构筑了拜耳法生产氧化铝流程的基准物流图。为定量分析拜耳法流程中物流对能耗的影响提供了比较的基准。并以某厂拜耳法流程的生产数据为依据, 绘制了该流程的实际物流图, 并构筑了与之对应的基准物流图。

2) 以实际物流图中的数据为依据, 分别计算了压煮溶出和管道化溶出生产 1 t 氧化铝的能耗。结果表明, 用压煮溶出要比用管道化溶出多耗能 6.935 GJ/t。所以, 为了降低吨氧化铝能耗, 应尽可能增加管道化溶出的比例, 降低压煮溶出的比例。

3) 用基准物流图研究法分析了拜耳法流程中物流对能耗的影响。在氧化铝生产流程中, 凡是由某工序向外界输出或返回上游工序处理的含氧化铝物料, 必增大该工序及上游工序的实物产量, 从而增大每吨氧化铝能耗, 而且越是后部工序, 耗能越多。

REFERENCES

- [1] 刘丽孺, 于庆波, 陆钟武, 等. 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 Liruo, YU Qingbo, LU Zhongwu, et al. Influence of material flow in alumina manufacturing process with Bayer-sinter combination method on its energy intensity[J]. Journal of Northeastern University (Natural Science), 2002, 23(10): 944-947
- [2] 陆钟武, 蔡九菊, 于庆波, 等. 钢铁生产流程的物流对能耗的影响[J]. 金属学报, 2000, 36(4): 370-378.
LU Zhongwu, CAI Jiuru, YU Qingbo, et al. Study on the influence of material flow on energy intensity of steel manufacturing process[J]. Acta Metallurgica Sinica, 2000, 36(4): 370-378.
- [3] 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 Qingbo, LU Zhongwu, CAI Jiuru. Study on the method for calculating influence of mass flow on energy intensity in steel manufacturing process[J]. Acta Metallurgica Sinica, 2000, 36(4): 379-382.
- [4] 于庆波, 陆钟武, 蔡九菊. 钢铁生产流程中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 Qingbo, LU Zhongwu, CAI Jiuru. The calculating form of influence of material flow on energy intensity in steel manufacturing process[J]. Journal of Northeastern University, 2001, 22(1): 71-74.
- [5] Lu Z W, Cai J J, Yu Q B, et al. The Influence of materials flow in steel manufacturing process on its energy intensity [A]. SONG Jian. Proceedings of International Conference on Engineering and Technological Science 2000 [C]. Beijing: New World Press, 2000. 1141-1146.
- [6] 刘丽孺, 陆钟武, 于庆波, 等. 氧化铝综合能耗的 ϵ_p 分析[J]. 中国有色金属学报, 2002, 12(6): 1294-1298.
LIU Liruo, LU Zhongwu, YU Qingbo, et al. ϵ_p analysis of the overall energy intensity of alumina production [J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2002, 12(6): 1294-1298
- [7] Spitzer D P. Development of new bayer process flocculants [A]. Light Metals [C]. Warrendale: TMS, 1991. 167-171.
- [8] WANG Qingwei, TIAN Gengyou, YANG Zhongyu. Aspect of deep desilication with lime agent [A]. Light Metals [C]. Warrendale: TMS, 1997. 29-33.
- [9] Adansib A N, Bloore E T, Carr A R. Basic principles of Bayer process design [J]. J Extr Met of Aluminum, 1963(1): 23.
- [10] Pawlek F. The leaching behavior of bauxite during mechanical chemical treatment [A]. Light Metals [C]. Warrendale: TMS, 1992. 91-95.

Influence of material flow in alumina manufacturing process with Bayer method on its energy intensity

LIU Liru^{1, 2}, LU Zhong-wu¹, YU Qing-bo¹, YAN Shu-ming¹, JIANG Yu-jing³, LI Zi-jian³

(1. School of Materials and Metallurgy, Northeastern University, Shenyang 110004, China;

2. Department of Environment, Shenyang Architectural and Civil Engineering Institute,
Shenyang 110015, China;

3. China Great Wall Aluminium Corporation, Zhengzhou 450041, China)

Abstract: Based on the concept of standard materials flow diagram (SMFD) of alumina manufacturing process, the SMFD of alumina manufacturing process by Bayer method was constructed. A comparative benchmark for analyzing the influence of material flow on energy intensity was provided. On the basis of the data of an alumina manufacturing plant by Bayer method, the real material flow diagram of this plant was drawn and the SMFD was constructed accordingly. The influence of the change of the unit process energy intensity and the alumina process product-ratios on the overall energy intensity and the influences of material flow in a manufacturing process on its energy intensity were analyzed quantitatively as an example.

Key words: alumina; Bayer method; standard materials flow diagram; real materials flow diagram; overall energy intensity; unit process energy intensity

(编辑 陈爱华)